Anat. 223 fhk-3,1

<36606348940011
S 1
<36606348940011
Bayer. Staatsbibliothek

Anat. 223 fhk -31

HANDBUCH

DER

PHYSIOLOGIE

bearbeitet von

Prof. H. AUBERT in Rostock, Prof. C. ECKHARD in Giessen, Prof. TH. W. ENGELMANN in Utrecht, Prof. SIGMUND EXNER in Wien, Prof. A. FICK in Würzburg, weil. Prof. O. FUNKE in Freiburg, Dr. P. GRÜTZNER in Breslau, Prof. R. HEIDENHAIN in Breslau, Prof. V. HENSEN in Kiel, Prof. E. HERING in Prag, Prof. L. HERMANN in Zürich, Prof. H. HUPPERT in Prag, Prof. W. KÜHNE in Heidelberg, Prof. B. LUCHSINGER in Bern, Prof. R. MALY in Graz, Prof. SIGMUND MAYER in Prag, Prof. O. NASSE in Halle, Prof. A. ROLLETT in Graz, Prof. J. ROSENTHAL in Erlangen, Prof. M. v. VINTSCHGAU in Innsbruck, Prof. C. v. VOIT in München, Prof. W. v. WITTICH in Königsberg, Prof. N. ZUNTZ in Bonn.

Herausgegeben

von

DR. L. HERMANN,

PROFESSOR DER PHYSIOLOGIE AN DER UNIVERSITÄT ZÜRICH.

Dritter Band.

Physiologie der Sinnesorgane.

ERSTER THEIL.

Physiologie des Gesichtssinns

von

A. Fick, W. Kühne u. E. Hering.

LEIPZIG
VERLAG VON F. C. W. VOGEL.
1879.

☞ Das **Register** zum III. Bande ist in dem 2. Theile enthalten. ☜

15

MEDICINISCHER VERLAG VON F. C. W. VOGEL IN LEIPZIG.

RANVIER'S Technisches Lehrbuch

der

Histologie.

Uebersetzt

von

Dr. W. Nicati u. Dr. H. v. Wyss

in Zürich.

Mit zahlreichen Holzschnitten.

1—5. *Lieferung.*

gr. 8. 1876—79. à 3 M.

Bernard's, Claude, Vorlesungen über die thierische Wärme, die Wirkungen der Wärme und das Fieber. Uebersetzt von Dr. A. Schuster in München. Mit 8 Holzschnitten. gr. 8. 1876. 8 M.

Binz, Prof. C. (Bonn), Zur Theorie der Salicylsäure- und Chininwirkung. gr. 8. 1877. 1 M.

Eberth, Prof. C. J. (Zürich), Die foetale Rachitis in ihren Beziehungen zu dem Cretinismus. Festschrift. Mit 3 Taf. gr. 4. 1878. 4 M.

Hermann's Handbuch der Physiologie. 6 Bände.

Hermann, Prof. L., Die Vivisectionsfrage. gr. 8. 1876. 1 M. 20 Pf.

Hertwig, Dr. O. u. Dr. R. (Jena), Das Nervensystem u. die Sinnesorgane der Medusen. Monogr. bearbeitet. Mit 10 Taf. gr. 4. 1878. 40 M.

Hueter, Prof. C., Die Allgemeine Chirurgie. Eine Einleitung in das Studium d. chirurgischen Wissenschaft. Mit 1 Tafel. gr. 8. 1873. 14 M.

Holmgren, Prof. F. (Upsala), Die Farbenblindheit in ihren Beziehungen zu den Eisenbahnen und der Marine. Deutsche Ausgabe. Mit 5 Holzschn. u. 1 Farbentafel. gr. 8. 1878. 3 M. 80 Pf.

Koch, Dr. R. (Wollstein), Untersuchungen über die Aetiologie der Wundinfectionskrankheiten. Mit 5 Tafeln. gr. 8. 1878. 5 M.

Landois, Prof. L. (Greifswald), Die Transfusion des Blutes. Mit 6 Holzschn. u. 4 Tafeln. gr. 8. 1875. 10 M.

—— Beiträge zur Transfusion des Blutes. gr. 8. 1878. 1 M.

Schmiedeberg, Prof. O. u. Dr. **R. Koppe** (Dorpat). Das Muscarin. gr. 8. 1869. 2 M. 40 Pf.

Zahn, Dr. J. (Rostock), Beiträge zur pathologischen Histologie des Diphtheritis. Mit 4 Tafeln. gr. 8. 1878. 6 M.



HANDBUCH

DER

PHYSIOLOGIE.

HANDBUCH

DER

PHYSIOLOGIE

BEARBEITET VON

Prof. H. AUBERT in Rostock, Prof. C. ECKHARD in Giessen, Prof. TH. W. ENGELMANN in Utrecht, Prof. SIGM. EXNER in Wien, Prof. A. FICK in Würzburg, weil. Prof. O. FUNKE in Freiburg, Dr. P. GRÜTZNER in Breslau, Prof. R. HEIDENHAIN in Breslau, Prof. V. HENSEN in Kiel, Prof. E. HERING in Prag, Prof. L. HERMANN in Zürich, Prof. H. HUPPERT in Prag, Prof. W. KÜHNE in Heidelberg, Prof. B. LUCHSINGER in Bern, Prof. R. MALY in Graz, Prof. SIGM. MAYER in Prag, Prof. O. NASSE in Halle, Prof. A. ROLLETT in Graz, Prof. J. ROSENTHAL in Erlangen, Prof. M. v. VINTSCHGAU in Innsbruck, Prof. C. v. VOIT in München, Prof. W. v. WITTICH in Königsberg, Prof. N. ZUNTZ in Bonn.

HERAUSGEGEBEN

VON

DR. L. HERMANN,

PROFESSOR DER PHYSIOLOGIE AN DER UNIVERSITÄT ZÜRICH.

DRITTER BAND.

I. THEIL.

LEIPZIG,
VERLAG VON F. C. W. VOGEL.
1879.

HANDBUCH DER PHYSIOLOGIE

DER

SINNESORGANE.

ERSTER THEIL.

GESICHTSSINN.

DIOPTRIK. NEBENAPPARATE DES AUGES.
LEHRE VON DER LICHTEMPFINDUNG.

VON A. FICK IN WÜRZBURG.

CHEMISCHE VORGÄNGE IN DER NETZHAUT

VON W. KÜHNE IN HEIDELBERG.

RAUMSINN DES AUGES. AUGENBEWEGUNGEN

VON E. HERING IN PRAG.

MIT 144 HOLZSCHNITTEN.

LEIPZIG,
VERLAG VON F. C. W. VOGEL.
1879.

Das Uebersetzungsrecht ist vorbehalten.

BIBLIOTHECA
REGIA
MONACENSIS

INHALTSVERZEICHNISS
zu Band III. Theil 1.

PHYSIOLOGIE DER SINNESORGANE I.*)

Physiologie des Gesichtssinns

von

PROF. A. FICK, PROF. W. KÜHNE, PROF. E. HERING.

Seite

Erster Theil. Dioptrik. Nebenapparate des Auges.

Von PROF. A. FICK.

Einleitung . 3

1. Capitel. Gang der Lichtstrahlen durch ein centrirtes System sphärischer Trennungsflächen 5

I. Brechung von Strahlenbündeln durch eine einzige sphärische Trennungsfläche . 5

II. Brechung von Strahlenbündeln durch mehrere Trennungsflächen . 13

2. Capitel. Anatomische Voraussetzungen 26

I. Die Hüllen des Augapfels 26

II. Die durchsichtigen Körper des Augapfels 29

III. Der intraoculare Druck 32

IV. Umgebung des Augapfels 35

3. Capitel. Numerische Bestimmung der für die Strahlenbrechung im Auge maassgebenden Grössen 40

I. Die Brechungsindices der durchsichtigen Augenmedien 40

II. Lage und Gestalt der Trennungsflächen 44

4. Capitel. Das schematische Auge 61

I. Die Cardinalpuncte des schematischen Auges 61

II. Das emmetropische Auge 65

III. Das myopische und das hypermetropische Auge 69

IV. Die Bilder seitlich gelegener Objecte 76

5. Capitel. Die Accommodation des Auges 82

I. Verschiedene Refractionszustände desselben Auges 82

II. Die Veränderungen des brechenden Systems 85

III. Mechanismus der Accommodation 92

6. Capitel. Abweichungen des wirklichen Auges vom idealen . . . 99

I. Farbenabweichung des Auges 99

*) Die allgemeine Empfindungslehre ist bei der Physiologie des Grosshirns im 2. Theil des II. Bandes abgehandelt.

Seite
II. Astigmatismus . 104
III. Unregelmässigkeiten des brechenden Apparates 118
7. Capitel. Das vom Augenhintergrunde zurückkehrende Licht. (Augenspiegel.) . 126

Zweiter Theil. Die Lehre von der Lichtempfindung.

Von Prof. A. Fick.

Einleitung . 139
1. Capitel. Bau der Netzhaut 140
2. Capitel. Ort der Reizung durch Lichtschwingungen 147
I. Anatomische Betrachtungen 147
II. Der blinde Fleck 149
III. Sehschärfe . 152
3. Capitel. Qualität der Lichtempfindungen 160
I. Allgemeine Betrachtungen 160
II. Die homogenen Farben 167
III. Die unsichtbaren Strahlen 178
IV. Symbolische Darstellung der Farbentöne 182
4. Capitel. Die gemischten Farben 185
I. Zusammenwirken von zwei homogenen Strahlungen 185
II. Symbolische Darstellung der gemischten Farben 191
III. Young's Theorie der Farbenempfindung 194
IV. Farbenton, abhängig von der Stärke des Reizes 200
V. Einige Methoden der Farbenmischung 202
VI. Hering's Theorie der Farbenempfindung 205
VII. Farbenblindheit . 206
5. Capitel. Zeitlicher Verlauf der Netzhauterregung 211
I. An- und Abklingen der Erregung. Reizung durch weisses Licht 211
II. An- und Abklingen der Erregung bei Reizung mit farbigem Licht 220
III. Ermüdung der Netzhaut 222
6. Capitel. Erregung der Netzhaut durch andere Ursachen als Lichtstrahlung . 228
I. Mechanische und electrische Reizung der Netzhaut 228
II. Eigenlicht der Retina 229
III. Einwirkung der Netzhautelemente auf einander. Contrast . . . 230
Anhang: Einige unerklärte subjective Lichterscheinungen . . . 233

Dritter Theil. Chemische Vorgänge in der Netzhaut.

Von Prof. W. Kühne.

Einleitung . 235
1. Capitel. Chemie der Netzhaut 239
I. Allgemeines chemisches Verhalten 239
II. Chemie des phototropen Epithels 241
1. Chemie des Retinaepithels 241
A) Die Kuppe der Epithelzellen 242
B) Basis und Fortsätze der Epithelzellen 247

Seite

2. Chemie des Sehepithels (Stäbchen und Zapfen) 251
A) Innenglieder der Sehzellen 252
B) Aussenglieder der Sehzellen (Cylinder und Kegel) 252
3. Farbstoffe der Sehzellen 258
A) Der Sehpurpur (Rhodopsin) 259
1) Vorkommen und Verbreitung des Sehpurpurs 263
2) Darstellung des Sehpurpurs 264
3) Optische Eigenschaften des Sehpurpurs. Farbe der Netzhaut in situ 267
4) Photochemische Zersetzung des Sehpurpurs 276
a) Wirkung des monochromatischen Lichtes 278
b) Wirkung des gemischten Lichtes 281
5) Chemisches Verhalten des Sehpurpurs 282
a) Reactionen . 282
b) Einfluss der Temperatur 283
c) Einfluss der Temperatur auf die Lichtbleiche 284
d) Chemische Einflüsse auf die Lichtbleiche 285
6) Indolenz und Fixirung der Sehfarbstoffe 286
7) Beziehungen der Stäbchenfluorescenz zum Sehpurpur . . 287
B) Farbstoffe der Zapfen. Die Chromophane 290
a) Darstellung und Trennung der Chromophane 292
b) Allgemeines Verhalten der Chromophane 294
Anhang: Retinale Farbstoffe der Wirbellosen 296

2. Capitel. Veränderungen der Netzhaut beim Sehen 297
I. Photochemische Zersetzungen in der sehenden Netzhaut 298
1. Verhalten der Stäbchen. Wirkung des farbigen Lichtes auf die lebende Netzhaut 298
2. Verhalten der Zapfen 308
3. Verhalten des Epithels 309
II. Regenerative Vorgänge. Das regenerirende Epithel. Regeneration im sehenden Auge 311
1. Die Rhodogenese . 317
2. Die Autoregeneration 319
3. Künstliche Rhodogenese 321
4. Lebensbedingungen des regenerirenden Epithels 323

3. Capitel. Bedeutung der photochemischen Processe für das Sehen 326
I. Optochemische Hypothese 326
1. Sehen ohne Sehpurpur 329
2. Hypothese mehrfacher Sehstoffe 331
II. Phototrope Erregungen in der Netzhaut. Abschichtungen im Epithelprotoplasma . 332
A) Verhalten des Pigmentepithels bei Dunkelfröschen 336
B) Verhalten des Pigmentepithels bei belichteten Fröschen . . . 337

Vierter Theil. Der Raumsinn und die Bewegungen des Auges.

Von Prof. E. Hering.

Erster Abschnitt. Das Sehen mit unbewegten Augen 343
Einleitung . 343

Seite

1. Capitel. Die Correspondenz der Netzhäute 349
I. Das Schema der Correspondenz 351
II. Genauere Bestimmung der Deckpuncte 355

2. Capitel. Die Localisirung im ebenen Sehfelde 366

3. Capitel. Der Horopter 375

4. Capitel. Von der Prävalenz und dem Wettstreite der Conturen 380

5. Capitel. Das Gesetz der identischen Sehrichtungen 386

6. Capitel. Das Sehen mit disparaten Stellen 392

7. Capitel. Die Richtigkeit der Localisirung im Sehraume 411
I. Die Localisirung des Kernpunctes 413
II. Localisirung der mittlen Längs- und Querebene 417
III. Localisirung der Kernfläche 417
IV. Die Localisirung in die Kernfläche 419

8. Capitel. Das Doppeltsehen des Einfachen und das Einfachsehen des Doppelten . 424

Zweiter Abschnitt. Das Sehen mit bewegten Augen 437

9. Capitel. Die Bewegungen des Blickpunctes 437

10. Capitel. Die Bewegungen des Augapfels 452
I. Vom Drehpuncte des Auges 452
II. Die Augenbewegungen beim Fernsehen 468
III. Die Augenbewegungen beim Nahsehen 496
IV. Aussergewöhnliche Augenbewegungen im Interesse des Einfachsehens 504
V. Rollungen der Augen bei seitlicher Neigung des Kopfes 507
VI. Die Augenmuskeln . 512

11. Capitel. Die Association der Augenbewegungen 519

12. Capitel. Die Localisirung bei bewegtem Blicke 531
I. Die Localisirung bei Blickbewegungen nach den Dimensionen der Breite und Höhe . 532
II. Die Localisirung bei Blickbewegungen nach der Dimension der Tiefe 539
III. Die Localisirung bei secundären Lagen der binoculären Blicklinie 544
IV. Vergleichung von Grössen und Lagen (Augenmaass) 552
V. Das Sehen von Bewegungen 556

13. Capitel. Der Einfluss der Erfahrungsmotive auf die Localisirung 564
I. Der Einfluss der Erfahrung im Allgemeinen 565
II. Einfluss der Erfahrungsmotive auf die allgemeinen räumlichen Eigenschaften der Gesichtsempfindungen 572
III. Einfluss der Erfahrung auf Gestalt und Ort der Empfindungen . 578

14. Capitel. Ueber Stereoscopie 584

15. Capitel. Ueber binoculare Farbenmischung und binocularen Contrast . 591
I. Ueber binoculare Farbenmischung 591
II. Ueber binocularen Contrast 600

Druckfehler . 602

PHYSIOLOGIE DES GESICHTSSINNS

VON

PROF. A. FICK IN WÜRZBURG, PROF. W. KÜHNE IN HEIDELBERG

UND

PROF. E. HERING IN PRAG.

ERSTER THEIL.

DIOPTRIK. NEBENAPPARATE DES AUGES.

VON

PROF. A. FICK IN WÜRZBURG.

EINLEITUNG.

Vorbemerkung. Der Verfasser der nachfolgenden beiden Abschnitte ist in der glücklichen Lage, in historischen und literarischen Nachweisen sparsamer als mancher Andere sein zu dürfen. Da erst vor wenigen Jahren die klassische monographische Darstellung der physiologischen Optik von HELMHOLTZ erschienen ist, welche der Literatur und Geschichte dieser Wissenschaft die grösste Sorgfalt widmet, und da jeder, der diesen Theil der Physiologie eingehend studiren will, doch nicht umhin kann, dies Werk zu Rathe zu ziehen, so hat der Verfasser nach Vollständigkeit nur streben zu sollen geglaubt in Angabe der Literatur, welche nach HELMHOLTZ erschienen ist.

Aufgabe der physiologischen Optik ist die Erklärung der Thatsache des alltäglichen Lebens, dass uns ein Blick mit gesunden Augen in den Raum hinaus bis zu einem gewissen Grade genaue Kenntniss giebt von der Gestalt und Lage der vor uns gelegenen Körper, sofern von ihrer Oberfläche Lichtstrahlen ausgehen und dass wir zugleich gewisse Unterschiede der Beschaffenheit des von jenen Körpern ausgesandten Lichtes wahrnehmen.

Diese Erscheinung ist offenbar nur dadurch möglich, dass die von den Oberflächen der vor uns gelegenen Körper ausgehenden Lichtstrahlen im Auge, in welches sie eindringen, ein System von Empfindungen derart erregen, dass jedem Theilchen der Oberfläche jener Körper eine besondere im Bewusstsein unterscheidbare Empfindung entspricht und dass die Beschaffenheit der einzelnen Empfindungen in irgend einer Weise abhängt von der Beschaffenheit der sie verursachenden Lichtstrahlen. Hierzu ist vor Allem, wie man leicht sieht, erforderlich, dass die von einem einzelnen Punkte der Oberfläche der vor uns gelegenen Körper ausgesandten Lichtstrahlen, sofern sie überall ins Auge eindringen, daselbst nur ein Nervenelement oder wenigstens nur eine eng begrenzte Gruppe von Nervenelementen erregt, denn nur auf diese Weise kann jenes System

von unterscheidbaren Empfindungen entstehen, deren jede als Zeichen für einen bestimmten Punkt der vor uns liegenden Körperoberflächen dienen kann. Es ist also, wenn anders der Sehakt erklärlich sein soll, nothwendig erstens dass irgendwo im Auge eine mosaikartige Ausbreitung von Nervenenden zu finden ist, deren jede mit einem Anhangsgebilde versehen ist, in welchem auffallendes Licht eine Arbeit leistet, die als Reiz für das Nervenende dienen kann. Zweitens muss vor dieser Nervenausbreitung ein Apparat liegen, welcher für Lichtstrahlen durchlässig und so beschaffen ist, dass die von einem Punkte ausserhalb in dasselbe eindringenden Lichtstrahlen auf einen möglichst eng begrenzten Theil des Nervenmosaiks koncentrirt werden. Wenn diese beiden Bedingungen erfüllt sind, so ist offenbar der Sehakt, wie wir ihn täglich wirklich vollziehen physiologisch erklärlich, denn es wird alsdann jeder Punkt der Oberfläche eines vor uns liegenden Körpers durch die von ihm ausgehenden Lichtstrahlen nur ein oder nur wenige Nervenelemente erregen und mithin eine von Anderen unterscheidbare Empfindung veranlassen.

Die Physiologie des Gesichtssinnes wird demnach vor Allem zu untersuchen haben, unter welchen Umständen die von allen möglichen Punkten des Raumes in ein System durchsichtiger Körper eindringenden Lichtstrahlen in diesem so geordnet werden, dass allemal die von einem Punkte ausserhalb ausgegangenen Strahlen wieder in einem Punkte einer innerhalb des Systemes gelegenen Fläche vereinigt werden. Den Inbegriff der Vereinigungspunkte aller der Strahlenbündel welche von den einzelnen Punkten der Oberfläche eines Gegenstands ausgegangen sind nennt man bekanntlich das optische „Bild“ des Gegenstandes. Man kann daher die soeben aufgeworfene Frage auch so aussprechen: unter welchen Umständen entsteht von den vor einem System durchsichtiger Körper gelegenen leuchtenden Punkten auf einer innerhalb des Systemes gelegenen Fläche ein „optisches Bild“?

Die Dioptrik lehrt dass ein sogenanntes centrirtes System sphärischer Trennungsflächen zwischen einer Reihe durchsichtiger Medien von jedem in einer zur Axe senkrechten Ebene ausgebreiteten Gegenstande unter gewissen Bedingungen ein optisches Bild erzeugt, das gleichfalls in einer zur Axe senkrechten Ebene liegt, und es lässt sich für ein bekanntes System dieser Art die Lage und Gestalt des Bildes nach sehr einfachen Regeln finden, wenn die Lage und Gestalt des Gegenstandes gegeben ist. Da wir später von diesen Lehren den ausgedehntesten Gebrauch werden zu machen haben, so sollen dieselben zunächst elementar entwickelt werden.

ERSTES CAPITEL.

Gang der Lichtstrahlen durch ein centrirtes System sphärischer Trennungsflächen.

I. Brechung von Strahlenbündeln durch eine einzige sphärische Trennungsfläche.

Wir stellen uns zwei durchsichtige Stoffe etwa Luft und Glas vor, welche von einander getrennt sind durch einen Abschnitt einer um den Punkt C beschriebenen Kugeloberfläche. Auf sie lassen wir jetzt im ersten Medium einen ganz beliebigen Lichtstrahl fallen und legen durch seine Richtung und den Mittelpunkt der Kugel eine Ebene, welche die „Einfallsebene" im Sinne der Optik sein wird. In ihr konstruiren wir die Zeichnung Fig. 1 auf welcher C der Mittelpunkt Px der Strahl x der Einfallspunkt und mithin Cx resp. ihre Ver-

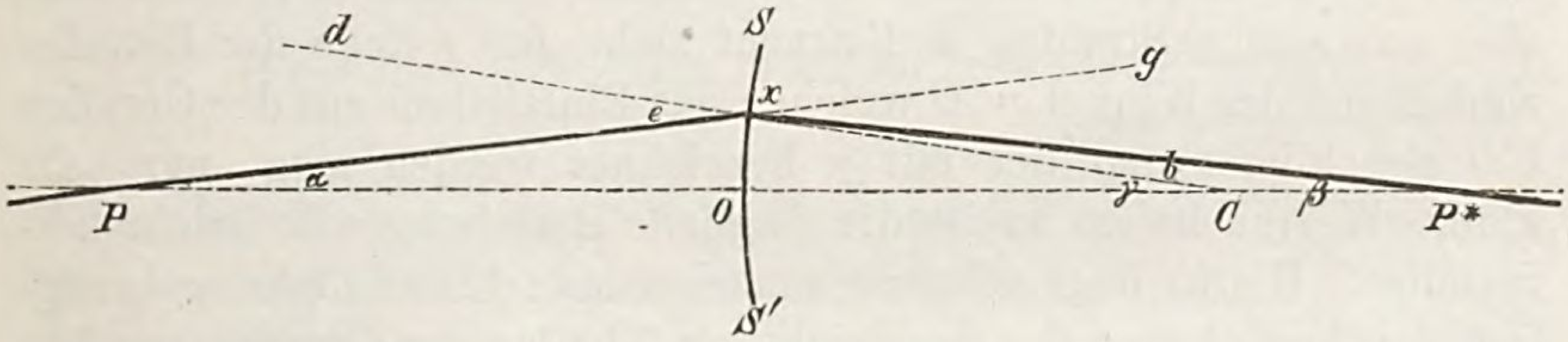


Fig. 1

längerung xd das Einfallsloth, endlich SS' der Kreisbogen ist, in welchem der Kugelabschnitt die Ebene schneidet. Wir ziehen nun in der Ebene durch C und einen willkürlich gewählten Punkt O des Kreisbogens SS' eine gerade CO welche verlängert den Strahl im Punkte P schneiden mag. Am Punkte x angekommen wird der Strahl Px bekanntlich zum Theil reflektirt zum Theil dringt er in das zweite Medium ein. Der reflektirte Theil des Strahles hat hier für uns kein Interesse. Wir verfolgen bloss den Gang des ins zweite Medium eintretenden, des sogenannten gebrochenen Strahles. Dieser Gang ist bekanntlich nach dem ersten Grundgesetze der Brechung in einfach brechenden Medien jedesfalls in der Einfallsebene d. h. also im vorliegenden Falle in der Ebene der Zeichnung enthalten und er bildet mit dem einwärts gerichteten Theile des Einfallslothes xC einen Winkel b, dessen Sinus zum Sinus des Einfallswinkels dxP oder e in einem für ein be-

stimmtes Paar brechender Medien konstantem Verhältniss steht und zwar ist dies Verhältniss

$$\frac{\text{Sin } e}{\text{Sin } b}$$

für den beispielsweise gewählten Uebergang des Lichtes aus Luft in Glas grösser als 1. Der gebrochene Strahl schliesst also mit dem nach innen gerichteten Theile des Einfallslothes einen kleineren Winkel ein als die Verlängerung des einfallenden Strahles xg. Da die Richtung des gebrochenen Strahles wie gesagt sicher in der Ebene der Zeichnung als der Einfallsebene zu finden ist, so muss sie auch die darin befindliche Linie OC schneiden. Der Durchschnittspunkt kann übrigens ebensowohl auf dem physisch vorhandenen Strahle rechts von x liegen als auf der rückwärts nach links zu denkenden Verlängerung der Richtung des gebrochenen Strahles. Wir wollen beispielsweise annehmen der Schnittpunkt läge in P^* rechts von x, was in unserem Falle wohl möglich ist, da der Winkel b kleiner ist als der Scheitelwinkel von e. Es soll nun eine Beziehung zwischen den Strecken OP und OP^* gesucht werden. Wenn die Richtung des einfallenden Strahles gar keiner Beschränkung unterworfen wird, so ist diese Beziehung nicht einfach darzustellen, wenn man aber nur solche Strahlen in Betracht zieht, für welche der Einfallswinkel und der Winkel xCO welchen das Einfallsloth mit der Geraden CO einschliesst und der mit γ bezeichnet werden mag, nur sehr kleine Werthe haben so ist die fragliche Beziehung sehr leicht herzustellen. Hierin liegt offenbar zunächst eine Einschränkung bezüglich der Ausdehnung des durchsichtigen Theiles der Grenze zwischen den beiden Medien es muss nämlich derselbe ein Kugelabschnitt sein, der nur einen kleinen Bruchtheil der ganzen Kugeloberfläche ausmacht, denn sonst würde man für jeden beliebigen einfallenden Strahl die Linie CO durch einen Punkt O des Abschnittes so legen können, dass der Centriwinkel xCO gross wäre. Zweitens dürfen aber auch, selbst wenn der durchsichtige Kugelabschnitt noch so klein angenommen ist, keine sehr schräg einfallende Strahlen in Betracht gezogen werden.

Werden nun in der That für die Winkel e und γ nur sehr kleine Werthe zugelassen und ist mithin auch der Winkel b jedesfalls sehr klein, so kann man ohne erheblichen Fehler für die Sinus dieser Winkel die Winkel selbst in Rechnung bringen und wenn man das konstante Verhältniss

$\frac{\text{Sin } e}{\text{Sin } b} = n$ setzt, ergiebt sich $\frac{e}{b} = n$ oder $e = nb$.

Es ist aber ferner bei der Kleinheit des Winkels xCO erlaubt den Bogen xO als eine auf OC senkrechte gerade Linie anzusehen. Es ist also wenn man den Winkel xPO mit α und xP^*O mit β sowie den Radius der Kugel OC mit r bezeichnet sehr annähernd

$$tg\,\alpha = \frac{Ox}{OP};\ tg\,\beta = \frac{Ox}{OP^*} \text{ und } tg\,\gamma = \frac{Ox}{OC} = \frac{Ox}{r}$$

und da bei kleinen Winkeln die trigonometrische Tangente, so wie der Sinus, dem Winkel selbst in Bogenmaass ausgedrückt gleich ist so hat man

$$\alpha = \frac{Ox}{OP};\ \beta = \frac{Ox}{OP^*} \text{ und } \gamma = \frac{Ox}{OC}.$$

Nun ist als Aussenwinkel des Dreieckes PxC der Winkel e oder $nb = \alpha + \gamma$ der Summe der beiden inneren gegenüberliegenden und aus demselben Grunde $\gamma = b + \beta$ oder $b = \gamma - \beta$. Einsetzen dieses Werthes in erstere Gleichung ergiebt $n(\gamma - \beta) = \alpha + \gamma$ oder $(n-1)\gamma = \alpha + n\beta$. Setzt man hier für die Winkel ihre oben gefundenen Werthe so hat man

$$\frac{(n-1)\,Ox}{OC} = \frac{Ox}{OP} + \frac{n\,.\,Ox}{OP^*}$$

oder wenn man durch Ox beide Seiten der Gleichung dividirt

$$\frac{n-1}{OC} = \frac{1}{OP} + \frac{n}{OP^*}, \text{ oder } OP^* = \frac{n}{\frac{n-1}{OC} - \frac{1}{OP}}$$

Hieraus erhellt sofort dass die Entfernung OP^* unabhängig ist von der Lage des Punktes x wo der einfallende Strahl die brechende Fläche trifft und ausser vom Brechungsindex n und dem Radius OC nur abhängt von OP. D. h. mit anderen Worten, wenn man durch einen willkürlich gewählten Radius OC der brechenden Fläche eine Ebene legt und in dieser Ebene einen Strahl auf die Fläche fallen lässt, so besteht zwischen den in der Richtung jenes Radius gemessenen Entfernungen seines Schnittpunktes mit dem einfallenden und dem gebrochenen Strahle vom Punkte O nämlich OP und OP^* eine Beziehung, welche von dem Einfallspunkte unabhängig ist. Wenn also mehrere einfallende Strahlen die Richtung des Radius OC in demselben Punkte P schneiden so schneiden die entsprechenden gebrochenen Strahlen jene Richtung gleichfalls in demselben Punkte P^*. Dies gilt aber von den durch P gehenden Strahlen in jeder durch CO oder CP gelegten Ebene also von allen Strahlen, die überhaupt von P ausgehend auf die Fläche fallen können.

Dieser Hauptsatz der Dioptrik lässt sich sehr zweckmässig noch anders ausdrücken wenn man zuvor einige kurze Bezeichnungen ein-

führt. Ein System von Lichtstrahlen, deren Richtungen sich alle in einem Punkte schneiden, heisse ein „homocentrisches Strahlenbündel“ und der gemeinsame Schnittpunkt dieser Richtungen heisse das Centrum. Das Centrum soll für ein einfallendes homocentrisches Bündel als „reell“ bezeichnet werden, wenn es von der brechenden Fläche aus gerechnet auf der Seite liegt von woher die Strahlen kommen, denn in diesem Falle kann das Centrum des einfallenden Bündels ein wirklicher Ausgangspunkt von Lichtstrahlen sein. Liegt der Durchschnittspunkt der Richtungen der einfallenden Strahlen von der brechenden Fläche nach der Seite, wohin die Strahlen gehen, so werde es als „virtuell“ bezeichnet, da er in diesem Falle nur der Durchschnittspunkt der verlängerten Strahlenrichtungen ist, welchen die physischen Strahlen, da sie durch die Brechung abgelenkt werden, nie wirklich erreichen. Um den Ausdruck abzukürzen soll künftig immer die Seite, woher die Strahlen kommen, als „vorn“, die Seite, wohin sie gehen, als hinten bezeichnet werden. Handelt es sich um ein homocentrisches Bündel gebrochener Strahlen, so muss man umgekehrt das Centrum als „reell“ bezeichnen, wenn es von der brechenden Fläche aus nach hinten liegt, denn in diesem Falle können die Strahlen sich im Centrum wirklich vereinigen. Als „virtuell“ ist das Centrum eines gebrochenen Strahlenbündels im Falle zu bezeichnen, wo er vor der Trennungsfläche liegt, denn es ist hier nur der geometrische Vereinigungspunkt der über die Einfallspunkte hinaus verlängerten Strahlenrichtungen, aus welchem sie nicht wirklich gekommen sind, da sie vor der Brechung andere Richtungen hatten.

Unter Anwendung dieser Bezeichnungen können wir den oben abgeleiteten Satz kurz dahin ausdrücken, ein auf den durchsichtigen Kugelabschnitt fallendes homocentrisches Strahlenbündel wird in ein homocentrisches gebrochenes verwandelt und es liegt das Centrum des letzteren auf einer durch das Centrum des einfallenden und den Mittelpunkt der Kugelfläche gezogenen Geraden in einer Entfernung OP^* von der Trennungsfläche, welche zur Entfernung des Centrums der einfallenden Strahlen von der Fläche (OP) in einer einfachen Beziehung steht die durch die obige Gleichung

$$\frac{n-1}{OC} = \frac{1}{OP} + \frac{n}{OP^*}$$

dargestellt wird. Dieser Satz gilt jedoch nur unter der oben ausdrücklich gesetzten Bedingung, dass alle einfallende Strahlen mit ihren respectiven Einfallslothen nur kleine Winkel bilden und dass auch die Centriwinkel, welche die Einfallslothe mit der durch das

Centrum des einfallenden Bündels und den Mittelpunkt der Kugel gezogenen Geraden (CP) bilden, nur klein sind. Man muss also, um dies noch einmal hervorzuheben, sich stets einen sehr kleinen Bruchtheil der gesammten Kugeloberfläche als brechende Fläche verwendet denken und man darf nur solche homocentrische einfallende Bündel in Betracht ziehen, deren Centra einerseits um ein ziemlich grosses Vielfaches der grössten Sehne SS^1 des durchsichtigen Kugelabschnittes von demselben abstehen und andererseits nicht weit seitwärts liegen von der Richtung eines beliebigen, durch einen Punkt der durchsichtigen Oberfläche gezogenen Kugelradius.

Die Centra eines einfallenden und eines gebrochenen Strahlenbündels in ihrer durch den bewiesenen Satz festgestellten Correlation nennt man „Objektpunkt“ und „Bildpunkt“, auf welche Bezeichnungen auch die Bestimmungen reell und virtuell in ihrer oben erklärten Bedeutung Anwendung finden. Man kann also auch sagen: Durch Brechung an einer sphärischen Trennungsfläche zwischen zwei ungleichartigen durchsichtigen Mitteln entsteht immer unter Voraussetzung jener einschränkenden Bedingungen für jeden (reellen oder virtuellen) Objektpunkt ein (reeller oder virtueller) Bildpunkt. Objektpunkt und Bildpunkt liegen stets mit dem Kugelmittelpunkt auf einer Geraden. Diese Gerade sofern sie durch die Lage des Objektpunktes schon gegeben ist heisse die Centrallinie desselben.

Wir wollen künftig immer die in der Centrallinie gemessene Entfernung eines Objektpunktes von der brechenden Fläche durch p und die in derselben Linie gemessene Entfernung des Bildpunktes mit p^* bezeichnen. Sofern der Schnittpunkt der Centrallinie mit dem brechenden Kugelabschnitte für die Messung beider Grössenarten den Ausgangspunkt bildet und wir die Objektabstände nach vorn, die Bildabstände nach hinten positiv rechnen entspricht zufolge der obigen Verabredungen ein positiver Werth von p einem reellen Objektpunkt ein negativer einem virtuellen und ebenso entspricht einem positiven Werthe von p^* ein reeller Bildpunkt einem negativen ein virtueller. Diese Feststellungen schliessen noch die mit ein, dass der durch r zu bezeichnende Kugelradius als positive Grösse in die Formel eingesetzt werden muss wenn der Mittelpunkt auf der Seite des zweiten Mediums von der Trennungsfläche liegt, d. h. wenn diese dem ersten Medium ihre konvexe Seite zukehrt im andern Falle ist die Grösse r als negative einzuführen. Mit Anwendung dieser Bezeichnungen lautet die Grundgleichung

$$\frac{n-1}{r} = \frac{1}{p} + \frac{n}{p^*} \dots\dots\dots\dots\dots (1)$$

Da hiernach der Werth von p^* nur von p ausser von den Konstanten des Medienpaares abhängt, so entspricht einem System von Objektpunkten, die in gleicher Entfernung von dem brechenden Kugelabschnitte d. h. auf einer dazu koncentrischen Kugelschale liegen, ein System von Bildpunkten, welche gleichfalls sämmtlich gleiche Entfernung vom brechenden Kugelabschnitte haben also gleichfalls auf einer zu ihm koncentrischen Kugelschale liegen. Es liegen auch je zwei entsprechende Objekt- und Bildpunkte auf derselben Centrale oder anders ausgedrückt: Die sämmtlichen Verbindungslinien der Objektpunkte mit ihren entsprechenden Bildpunkten schneiden sich im Mittelpunkte der Kugel, von welcher die brechende Fläche ein Abschnitt ist. Ein System von Objektpunkten nennt man überhaupt ein „Objekt“ und das zugehörige System von Bildpunkten sein „Bild“. Liegt also ein Objekt auf einer zur brechenden Fläche koncentrischen Kugelschale so liegt auch sein Bild ganz auf einer eben solchen. Auch sieht man ohne Weiteres dass das Bild und Objekt einander geometrisch ähnlich sind und dass sie zueinander perspektivisch liegen bezüglich zum Mittelpunkt der Kugel. Unter perspektivischer Lage zueinander versteht man diejenige Lage zweier räumlicher Gebilde zu einander bei welcher die sämmtlichen Verbindungslinien zweier entsprechender Punkte der beiden Gebilde sich in einem und demselben Punkte schneiden. Selbstverständlich hat die Möglichkeit zwei räumliche Gebilde in perspektivische Lage zu einander zu bringen gewisse Eigenschaften der beiden Gebilde zur Voraussetzung. Beiläufig gesagt gilt der Satz dass Bild und Objekt zu einander perspektivisch liegen unabhängig von der Bedingung dass sie auf koncentrischen Kugelschalen liegen. Dagegen hat die geometrische Aehnlichkeit nur unter dieser Bedingung statt.

Gemäss den immer erfüllt zu denkenden einschränkenden Bedingungen kann der brechende Kugelabschnitt nach allen Seiten nur sehr kleine Centriwinkel umspannen und weicht also nur wenig von einem Stück einer ihn berührenden Ebene ab. Ebenso können aber auch die ein Objekt und das Bild enthaltenden Stücke koncentrischer Kugelschalen nur sehr kleine Abschnitte der ganzen Kugel sein und mithin ebenfalls annäherungsweise als Stücke von Ebenen betrachtet werden, welche der als eben betrachteten Trennungsfläche parallel sind. Gestatten wir uns diese Vereinfachung, so spricht sich unser Satz dahin aus, dass von einem Objekt, das in einem zur Trennungsfläche parallelen ebenen Flächenstück ausgebreitet ist, durch Brechung ein optisches Bild entsteht, das gleichfalls in einem zur Tren-

nungsfläche parallelen ebenen Flächenstücke ausgebreitet ist. Bild und Object sind geometrisch ähnliche ebene Punktsysteme und entsprechende lineare Abmessungen beider verhalten sich offenbar wegen der perspektivischen Beziehung zum Centrum der Kugel wie die Abstände der Objektebene und der Bildebene von diesem Centrum oder gemäss der oben eingeführten Bezeichnungsweise wie $p + r$ zu $p^* - r$.

Betrachten wir jetzt den besonderen Fall wo ein Objektpunkt in unendlicher Ferne liegt, wo also das von ihm ausgesandte Strahlenbündel aus lauter parallelen Strahlen besteht, so können wir den Abstand des Bildpunktes leicht berechnen, wenn wir für p den Werth ∞ in unsere Formel (1) einsetzen. Sie wird dadurch

$$\frac{n-1}{r} = \frac{1}{\infty} + \frac{n}{p^*},$$

woraus sich für p^* der besondere Werth

$$\frac{nr}{n-1}$$

berechnet den wir mit f^* bezeichnen und die „zweite Hauptbrennweite“ des Medienpaares nennen wollen. Denken wir in dieser bestimmten Entfernung

$$\frac{nr}{n-1}$$

oder f^* von der Trennungsfläche ein zu ihr paralleles ebenes Flächenstück, so muss in ihm jedes Bild eines unendlich entfernten Objektes was den sonstigen Bedingungen entspricht zu finden sein. Wir nennen diese Ebene die „zweite Hauptbrennebene“.

Fragen wir zweitens: Wie weit von der Fläche muss ein Objektpunkt abstehen, wenn ein von ihm ausgegangenes Strahlenbündel durch die Brechung in ein parallelstrahliges verwandelt werden soll, dessen Vereinigungspunkt also erst in unendlicher Ferne gefunden wird? Diese Aufgabe sucht einen Werth von p welchem ein unendlich grosser Werth von p^* entspricht. Man hat also nur in die Grundformel für p^* den Werth ∞ einzusetzen und dann p zu berechnen. Es ergiebt sich aber aus

$$\frac{n-1}{r} = \frac{1}{p} + \frac{n}{\infty}\, p = \frac{r}{n-1}.$$

Diesen Werth von p wollen wir die „erste Hauptbrennweite“ nennen und durch f bezeichnen. Legt man demnach in diese Entfernung f von der Trennungsfläche ein ihr paralleles ebenes Flächenstück so hat man den geometrischen Ort aller Objektpunkte, deren Bildpunkte in unendliche Entfernung fallen, diese Ebene hiesse die

erste Hauptbrennebene. Es ist für ein Medienpaar vor Allem charakteristisch ob seine Hauptbrennweiten positiv oder negativ sind. Das erstere ist offenbar der Fall wenn $n > 1$ und r positiv ist oder wenn $n < 1$ und zugleich r negativ ist, d. h. nach den obigen Festsetzungen stets dann, wenn die Trennungsfläche ihre konvexe Seite dem schwächer brechenden Medium zukehrt, mag man dies als erstes oder als zweites Medium nehmen. Im andern Falle sind f und f^* negativ. Im ersten Falle entsteht von einem unendlich fernen Objekte in der Entfernung f^* hinter der Trennungsfläche ein reelles Bild im zweiten Falle werden parallelstrahlig auffallende Bündel in divergirende verwandelt deren Richtungen sich nur geometrisch rückwärts verlängert in je einem Punkte schneiden in einer Entfernung f^* von der Trennungsfläche, welcher ein negativer Werth zukommt. Ein Mediensystem mit positiven Brennweiten heisst ein „kollektives“ eines mit negativen Brennweiten ein „dispansives“.

Durch Einführung der Grössen f und f^* kann man der Grundformel eine neue Gestalt geben, die im weiteren Verlaufe der Untersuchung zur Anwendung bequemer ist als die ursprüngliche. In der That haben wir gesehen dass

$$f = \frac{r}{n-1} \text{ oder } \frac{1}{f} = \frac{n-1}{r}$$

ist und ferner dass

$$f^* = \frac{nr}{n-1} = nf, \text{ also } n = \frac{f^*}{f}$$

ist wenn wir also in die Formel

$$\frac{n-1}{r} = \frac{1}{p} + \frac{n}{p^*} \text{ für } \frac{n-1}{r}$$

und n ihre in f und f^* ausgedrückten Werthe einsetzen, so ergiebt sich

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{f^* : f}{p^*} \text{ oder } 1 = \frac{f}{p} + \frac{f^*}{p^*} \quad \ldots\ldots\ldots (2)$$

Kennt man also für ein durch einen Kugelabschnitt getrenntes Medienpaar die beiden Hauptbrennweiten, welche sich leicht empirisch ermitteln lassen, so kann man ohne das Brechungsverhältniss und den Radius in Rechnung zu ziehen für jeden Objektabstand p den Bildabstand p^* berechnen.

Für ein kollektives System (wo f und f^* positive Werthe haben) ergiebt die Formel, dass jedem reellen Objekte dessen Abstand $p > f$ ist ein reelles Bild entspricht dessen Abstand $p^* > f^*$ ist. Man kann ferner noch folgenden Satz aus der Formel leicht herauslesen: Wenn man einen reellen Objektpunkt mit konstanter Geschwindigkeit auf einer beliebigen Centrallinie aus sehr grosser Ferne gegen die

erste Brennebene heranrücken lässt so bewegt sich der Bildpunkt auf derselben Centrallinie von der zweiten Hauptbrennebene aus in der Richtung der Strahlen anfangs nur sehr langsam und dann immer schneller bis er zuletzt mit unendlich grosser Geschwindigkeit die unendliche Ferne erreicht, wenn der Objektpunkt in die erste Brennebene eintritt. Lässt man den reellen Objektpunkt über die erste Brennebene hinaus nach der Fläche wandern (wo dann $p < f$ ist) so taucht der Bildpunkt aus der unendlichen Ferne in der Richtung von woher die Strahlen kommen nunmehr virtuell geworden wieder auf und eilt als solcher dem reellen Objektpunkte nach, den er gerade erreicht, wenn dieser in die Trennungsfläche selbst eintritt. Will man den Objektpunkt in derselben Richtung über die Trennungsfläche hinaus noch weiter wandern lassen, so hat man es nunmehr mit einem virtuellen Objektpunkte d. h. mit dem Centrum eines konvergent auffallenden Strahlenbündels zu thun (p ist negativ zu nehmen). Der Objektpunkt wird jetzt wieder reell (p^* positiv). Er bewegt sich anfangs noch mit grösserer dann aber abnehmender Geschwindigkeit vor dem immer virtuellen Objektpunkt her, von dem er im Centrum der Kugel eingeholt wird. Bei noch weiterem Vorrücken des virtuellen Objektpunktes geht der reelle Bildpunkt mit immer abnehmender Geschwindigkeit hinter ihm her und trifft gerade wieder in der zweiten Brennebene ein, wenn der virtuelle Objektpunkt in unendliche Ferne hinausgerückt ist, was ja in der That so viel heisst, als dass wir wieder wie zuerst ein parallelstrahlig einfallendes Bündel haben. Es giebt also auf jeder Centrallinie eines Medienpaares zwei Punkte wo Objektpunkt und Bildpunkt zusammenfallen nämlich das Centrum und der Schnittpunkt der Centrale mit der Trennungsfläche.

II. Brechung von Strahlenbündeln durch mehrere Trennungsflächen.[1]

Wir wollen uns nun ein System von beliebig vielen brechenden Medien vorstellen. Jedes folgende sei vom vorhergehenden getrennt durch einen Kugelabschnitt, welcher nur einen sehr kleinen Bruchtheil der gesammten Kugeloberfläche ausmacht. Die sämmtlichen Centra dieser Kugeloberflächen sollen auf einer geraden Linie liegen, welche die Axe des Systems heissen mag. Endlich setzen wir noch fest, dass die wirklich durchsichtigen Theile der Kugelabschnitte in

1 Die Darstellung dieses ganzen Paragraphen hält sich an den Gedankengang, der zuerst von C. Neumann entwickelt ist, in einer Abhandlung über „Die Haupt- und Brennpunkte eines Linsensystemes“. Leipzig 1866.

ihren Mitten oder „Scheiteln“ von der Axe durchsetzt werden, so dass jeder Kugelabschnitt nahezu gelten kann als ein Stück einer zur Axe senkrechten Ebene. Ein solches System haben wir schon in der Einleitung als ein „centrirtes“ System sphärischer Trennungsflächen zwischen einer Reihe von brechenden Medien bezeichnet.

Stellen wir uns nun im ersten Medium ein einfallendes d. h. auf die erste Trennungsfläche zugehendes homocentrisches Strahlenbündel vor dessen Centrum in einigem Abstande von der ersten Fläche und nicht weit seitwärts von der Axe liegt, so entspricht dasselbe den Bedingungen, welche zur Anwendung der soeben entwickelten Gesetze auf die erste Brechung die es erleiden wird genügen. Nehmen wir also ein ganzes System solcher Strahlenbündel an, deren Centra alle in einer zur Axe senkrechten Ebene liegen, so wird durch die erste Brechung ein System von Strahlenbündeln entstehen deren Centra ebenfalls in einer zur Axe senkrechten Ebene liegen. Kurz ausgedrückt wird die erste Brechung von einem ebenen zur Axe senkrechten Objekte ein (reelles oder virtuelles) Bild erzeugen. Auch werden Objekt und Bild zueinander perspektivisch sein bezüglich zu einem in der Axe gelegenen Punkte nämlich zum Centrum der ersten Fläche. Dies Bild d. h. das System der Centra der im zweiten Medium sich fortpflanzenden Strahlenbündel kann man aber offenbar auffassen als (reelles oder virtuelles) Objekt für die zweite Brechung, welche die Strahlen beim Uebergange aus dem zweiten ins dritte Medium erleiden. Da das für den neuen Standpunkt als Objekt zu behandelnde Bild unter den gemachten Voraussetzungen auch den Bedingungen entsprechen muss, welche die Anwendung der obigen Regeln auf die zweite Brechung gestatten so wird durch die zweite Brechung abermals ein Bild entstehen, dessen Punkte in einer zur Axe senkrechten Ebene liegen und das perspektivisch zum Objekte also zum ersten Bilde ist bezüglich zu einem ebenfalls in der Axe gelegenen Punkte nämlich zum Centrum der zweiten Fläche. Es gilt nun folgender Satz der so leicht einzusehen ist, dass der Beweis nicht ausgeführt zu werden braucht: wenn von drei Punktsystemen A, B, C welche in drei einander parallelen Ebenen liegen das erste und das dritte zum zweiten perspektivisch sind bezüglich zu zwei Punkten, welche beide in ein und derselben zu den drei Ebenen senkrechten Geraden liegen dann ist auch das zweite zum ersten perspektivisch gelegen bezüglich auf einen in derselben Geraden gelegenen Punkt. Es ist also das durch die zweite Brechung erzeugte Bild zum ursprünglichen Objekte perspektivisch gelegen bezüglich auf einen in der Axe befindlichen Punkt. Durch weitere Anwen-

dung desselben Satzes auf die folgenden Brechungen kommen wir zu dem Schlusse: das Ergebniss der sämmtlichen aufeinanderfolgenden Brechungen so viele ihrer auch stattfinden mögen, ist ein Bild dessen Punkte in einer zur Axe senkrechten Ebene liegen und welches perspektivisch liegt zum ursprünglichen Objekte und da auch dies in einer zur Axe senkrechten Ebene liegt sind das letzte Bild und das ursprüngliche Objekt auch geometrisch ähnlich. Schon nach diesem Resultate kann man den Begriff der Hauptbrennebenen auf das System beliebig vieler brechenden Medien übertragen. Man kann nämlich als zweite Hauptbrennebene diejenige zur Axe senkrechte Ebene definiren, welche das Bild eines unendlich fernen Objektes enthält und als erste Hauptbrennebene diejenige, in welcher das Objekt liegen muss, wenn das schliessliche Bild in unendlicher Entfernung liegen soll. Die Schnittpunkte dieser beiden Ebenen mit der Axe sollen die Hauptbrennpunkte heissen und durch F^* und F bezeichnet werden. Wir schliessen den Fall wo F und F^* in unendlicher Ferne liegen, von den folgenden Betrachtungen aus. Wir können auch sogleich noch den Satz aussprechen, dass das Bild jedes in der Axe gelegenen Objektpunktes ebenfalls in der Axe liegen muss, denn der mit der Axe zusammenfallende Strahl eines solchen einfallenden Bündels geht ohne Aenderung der Richtung durch das ganze System da er auf alle Flächen senkrecht trifft, einer der gebrochenen Strahlen fällt also mit der Axe zusammen und auf ihr muss der Bildpunkt liegen, da er ja auf jedem der gebrochenen Strahlen liegt.

Es soll jetzt bewiesen werden, dass in dem System, mag es sonst beschaffen sein wie es wolle, wenn es nur den vorhin ausgesprochenen Bedingungen genügt, zwei zur Axe senkrechte Ebenen existiren deren erster als Objektebene, die zweite als Bildebene so entspricht, dass zu einem in der ersten beliebig angenommenen Objektpunkte ein Bildpunkt gehört, der in der zweiten Ebene und mit dem Objektpunkt auf derselben zur Axe parallelen Geraden liegt, dass die beiden Punkte sich in derselben durch die Axe gelegten Ebene finden müssen versteht sich von selbst, weil es von jedem als Objekt und Bild zusammengehörigen Paare von Punkten wegen der allgemeinen perspektivischen Beziehung gilt.

Zum Zwecke des Beweises der Existenz zweier solcher Ebenen stellen wir uns vor es sei AA_1 (Fig. 2) die Axe des Systemes und die Kreisbogen S_1S_1, S_2S_2, S_3S_3 seien die Schnitte der brechenden Flächen mit der Ebene der Zeichnung, deren Zahl natürlich auch grösser als 3 gedacht werden darf. Das erste Medium haben wir uns also links von S_1S_1 zu denken das letzte (hier das 4.)

rechts von $S_3 S_3$. Die Punkte F und F^* seien der erste und zweite Brennpunkt des Systemes. Wir denken uns nun einen einfallenden Strahl Px parallel zur Axe. Diesem muss als gebrochener im letzten Medium ein Strahl entsprechen, dessen Richtung nothwendig durch den Brennpunkt F^* geht, da der Strahl Px betrachtet werden kann

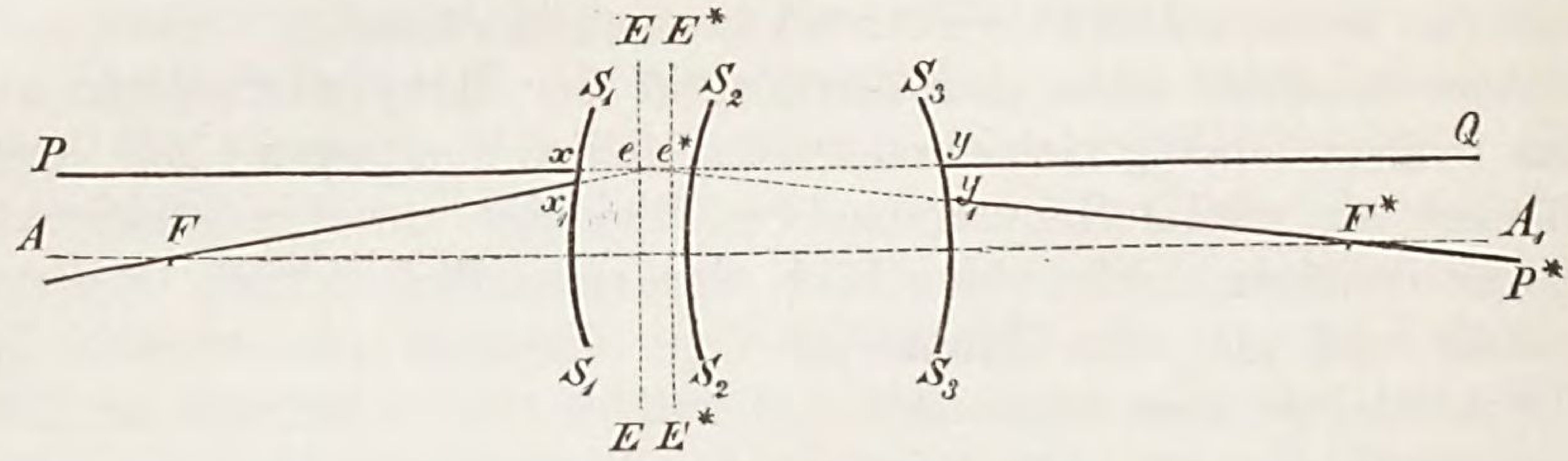


Fig. 2.

als Bestandtheil eines Bündels, das von einem in der Axe unendlich weit abstehenden Punkte ausgegangen ist, und dessen Bild folglich F^* ist. Ferner liegt der gebrochene Strahl nothwendig mit dem einfallenden und mit der Axe in einer Ebene, d. h. in der Ebene der Zeichnung, die für die sämmtlichen vorkommenden Brechungen „Einfallsebene“ ist. Die Richtung dieses Strahles muss demnach die Richtung des einfallenden Strahles nothwendig irgendwo im Endlichen also etwa im Punkte e^* schneiden, da wir den Fall ausdrücklich ausgeschlossen haben, wo das System die Besonderheit hätte, dass einem parallelstrahligen einfallenden Bündel ein parallelstrahliges im letzten Medium entspräche.

Wir denken uns nun zweitens die fortgesetzte Richtung des einfallenden Strahles Px von der letzten Fläche an als einen physischen gebrochenen Strahl yQ und sehen sogleich, dass diesem als einfallender Strahl einer entsprechen muss, der durch den Punkt F geht und der ebenfalls in der Ebene der Zeichnung liegt, da der angenommene gebrochene Strahl yQ Bestandtheil eines nach einem unendlich fernen Bildpunkt in der Axe konvergirenden Bündels sein könnte, welcher dem Punkt F als Objektpunkt entsprechen würde. Der zu yQ gehörige einfallende Strahl muss aber aus den schon ausgeführten Gründen die Richtung yQ resp. PQ im Endlichen treffen, der Schnittpunkt sei beispielsweise e. Es kann also nicht bezweifelt werden, dass auf irgend einer zur Axe parallelen Richtung PQ zwei Punkte e und e^* zu finden seien von denen der eine e Durchschnittspunkt zweier einfallender Strahlen ist und von denen der andere e^* der Durchschnittspunkt der jenen beiden entsprechenden gebrochenen

Strahlen ist. Es bedarf wohl nicht der Ausführung des logischen Beweises dafür, dass zwei solche Punkte in der Beziehung von Objektpunkt und Bildpunkt zueinander stehen, d. h. dass alle Strahlen, welche sich als einfallende im Punkte e schneiden nach erlittenen Brechungen ein homocentrisches Bündel bilden, dessen Centrum e^* ist.

Legen wir nun durch e und e^* zwei zur Axe senkrechte Ebenen EE und E^*E^* so sind es diejenigen, welche in der vorhin angekündigten Wechselbeziehung stehen. Denn wenn man von einem Punkte einer zur Axe senkrechten Ebene weiss, dass sein Bildpunkt in einer bestimmten zweiten zur Axe senkrechten Ebene enthalten ist, so müssen alle Bildpunkte in der letzteren liegen, welche in der ersteren gelegenen Objektpunkten entsprechen. Die allgemein gültige perspektivische Beziehung zwischen Objekt und Bild ergiebt aber sofort noch den Satz, dass einem Punkte der Ebene E als Objektpunkt derjenige Punkt der Ebene E^* als Bildpunkt entsprechen muss, welcher auf einer durch den Objektpunkt zur Axe parallelen Geraden liegt. In der That kann ja der Punkt der Axe, wo sich alle Verbindungslinien der Objektpunkte und ihrer Bildpunkte schneiden hier nur der unendlich ferne Punkt der Axe sein, da sich in ihm zwei dieser Verbindungslinien nämlich PQ und die Axe selbst schneiden. Die beiden soeben definirten Ebenen sollen die erste und zweite „Hauptebene“ und ihre Durchschnittspunkte mit der Axe der erste und zweite Hauptpunkt heissen. Diese beiden Punkte sollen gleichfalls mit den Buchstaben E und E^* bezeichnet werden.

Der Abstand des ersten Brennpunktes F von der ersten Hauptebene E heisse die „erste Hauptbrennweite“ und werde mit f bezeichnet, ebenso heisse die Entfernung E^*F^* die zweite Hauptbrennweite des Systems und werde mit f^* bezeichnet, f und f^* sind offenbar Grössen, welche für ein bestimmtes System ein für allemal angebbare konstante Werthe besitzen. Ferner wollen wir auch alle anderen Objektabstände, die wie früher mit p bezeichnet werden sollen, von E aus messen und zwar mit der Bestimmung, dass ein positiver Werth von p die Lage des Objektpunktes auf der Seite von E andeute, von wo die Strahlen kommen, ein negativer die Lage auf der Seite von E wohin die Strahlen gehen, diese Bestimmung gilt auch für die Brennweite f. Andererseits sollen die mit p^* zu bezeichnenden Bildabstände von E^* aus gemessen werden und hier soll ein positiver Werth von p^* andeuten, dass der Bildpunkt auf der Seite von E^* liegt, nach welcher die Strahlen hingehen, ein negativer, dass er auf der Seite liegt von wo die Strahlen kommen,

diese letztere Bestimmung ist auch für das Vorzeichen von f^* maassgebend. Es lässt sich nun leicht zeigen, dass zwischen den soeben definirten Grössen, nämlich den Konstanten f und f^* und den Variablen p und p^* dieselbe Gleichung gilt, welche wir für die weiter oben in einem Medienpaare definirten Grössen ähnlicher Bedeutung gültig gefunden haben.

In der That es sei AA_1 (Fig. 3) die Axe des Systems E und E^* seine Hauptebenen resp. Hauptpunkte, F und F^* seine Brennpunkte.

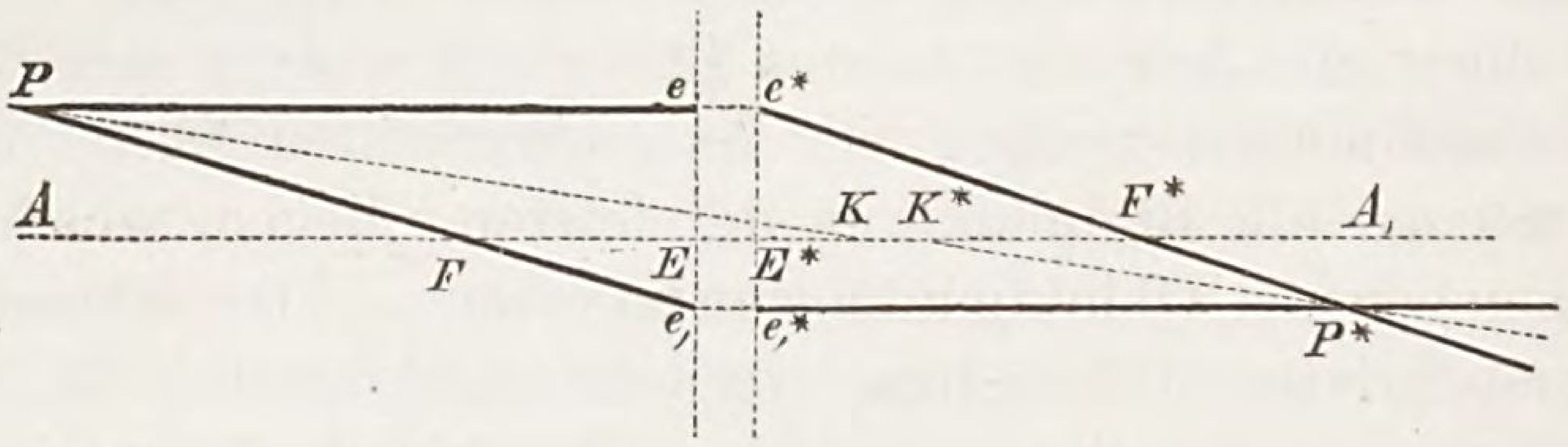


Fig. 3.

Es sei ferner P ein beliebig gewählter nur den allgemeinen Grundbedingungen entsprechender Objektpunkt. Von den einfallenden Strahlen, welche in ihm ihr Centrum haben, wählen wir zwei aus, nämlich denjenigen Pe, welcher der Axe parallel geht und denjenigen PF, welcher den ersten Brennpunkt F enthält. Der erstere könnte einerseits Bestandtheil eines Bündels sein das der Punkt e, wo er die erste Hauptebene trifft zum Centrum hat. Da nun dem Punkt e der in der Verlängerung von Pe gelegene Punkt e^* der zweiten Hauptebene als Bildpunkt entspricht, so muss der entsprechende gebrochene Strahl durch den Punkt e^* gehen. Pe kann aber auch als Bestandtheil eines Bündels betrachtet werden, dessen Strahlen der Axe parallel verlaufen, es muss ihm also als gebrochener ein Strahl entsprechen, dessen Richtung durch den zweiten Brennpunkt F^* geht. Durch diese zwei Bestimmungen ist der zu Pe als einfallendem gehörige gebrochene Strahl vollständig gegeben, er muss in die Richtung der Verbindungslinie von e^* und F^* fallen.

Der zweite gewählte einfallende Strahl PF treffe gehörig verlängert die Ebene E in e_1; dann muss die Richtung des gebrochenen Strahles gemäss der Beziehungen der Hauptebenen durch denjenigen Punkt $e_1{}^*$ der Ebene E^* gehen, welcher mit e_1 auf einer zur Axe parallelen Geraden liegt. Sie muss aber mit dieser Geraden selbst überdiess zusammenfallen, da der einfallende Strahl durch F geht und ein von F ausgehendes Bündel nach erlittenen Brechungen aus lauter zur Axe parallelen Strahlen besteht. Der Punkt P^* also wo die durch $e_1{}^*$ zur Axe parallel gezogene Gerade die zuerst kon-

struirte Linie e^*F^* schneidet, ist der Bildpunkt für den Objektpunkt P, denn wo sich zwei gebrochene Strahlen schneiden, welche zweien demselben homocentrisch einfallenden Bündel angehörenden entsprechen, da müssen sich alle schneiden, da ja das gebrochene Bündel ein homocentrisches sein soll.

Man bemerkt nun leicht, dass die Dreiecke Fe_1E und Pe_1e einander ähnlich sind, und ebenso die Dreiecke $E^*e^*F^*$ und $e_1{}^*e^*P^*$. Es gelten daher die beiden Gleichungen

$$\frac{e_1E}{e_1e} = \frac{FE}{Pe} \text{ und } \frac{e^*E^*}{e_1{}^*e^*} = \frac{E^*F^*}{e^*P^*}$$

oder da gemäss der verabredeten Bezeichnungsweise $FE = f$, $E^*F^* = f^*$, $eP = p$ und $e_1{}^*P^* = p^*$ ist

$$\frac{e_1E}{e_1e} = \frac{f}{p} \text{ und } \frac{e^*E^*}{e_1{}^*e^*} = \frac{f^*}{p^*},$$

addirt man diese beiden Gleichungen zueinander so ergiebt sich

$$\frac{e_1E}{e_1e} + \frac{e^*E^*}{e_1{}^*e^*} = \frac{f}{p} + \frac{f^*}{p^*},$$

da aber offenbar $e_1e = e^*e_1{}^*$ ist, sowie $e^*E^* = eE$ so ist die Summe linker Hand $= 1$ und die Gleichung geht über in

$$1 = \frac{f}{p} + \frac{f^*}{p^*} \dots\dots\dots\dots\dots (2^*)$$

Bezeichnet man die senkrechte Entfernung des Objektpunktes von der Axe $eE = e^*E^*$ (Siehe Fig. 3) mit l und die senkrechte Entfernung des entsprechenden Bildpunktes $e_1E = e_1{}^*E^*$ mit l^* so erhält man durch Division der soeben zueinander addirten Gleichungen noch die Beziehung $\frac{l}{l^*} = \frac{pf^*}{p^*f}$ oder $l\frac{f}{p} = l^*\frac{f^*}{p^*}$.

Man kann aber auch aus der Aehnlichkeit der beiden Dreieckspaare noch folgern $\frac{l}{l^*} = \frac{p-f}{f} = \frac{f^*}{p^*-f^*}$

und da, wenn die Summe der Dividenden durch die Summe der Divisoren zweier gleicher Quotienten dividirt ein ihnen gleicher Quotient entsteht

$$\frac{l}{l^*} = \frac{p + (f^* - f)}{p^* - (f^* - f)} \dots\dots\dots\dots\dots (3)$$

Die Differenz der beiden Brennweiten spielt in dieser Formel offenbar eine ähnliche Rolle, wie der Halbmesser einer einzigen trennenden Kugelfläche in der S. 11 ausgedrückten Beziehung zwischen der Grösse des Objektes und des Bildes. Wir wollen sie mit ϱ bezeichnen und wollen diese Länge von E und E^* aus auf der Axe abtragen in der Richtung, nach welcher die Strahlen gehen. Wir erhalten so die beiden Punkte K und K^* (Siehe Fig. 3), welche wir

die Knotenpunkte des Systems nennen wollen. Diese Punkte haben offenbar zufolge der Gleichung (3) die Eigenschaft, dass irgend eine lineare Erstreckung eines zur Axe senkrechten Objektes sich zur entsprechenden Erstreckung des Bildes verhält, wie der Abstand des Objektes vom ersten zum Abstande des Bildes vom zweiten Knotenpunkte. Man sieht ferner leicht, dass K^* das Bild von K ist, denn der Werth von ϱ für p und p^* in die Grundgleichung eingesetzt genügt derselben, nur muss man beachten, dass für p die Grösse ϱ mit negativen Vorzeichen einzusetzen ist, da K als Objektpunkt betrachtet hinter der ersten Hauptebene liegt. Hieraus, in Verbindung mit der ersten Eigenschaft der Knotenpunkte, ergiebt sich noch die Folgerung, dass jedem im ersten Medium auf K zielenden Strahle im letzten Medium ein durch K^* gehender dem einfallenden paralleler Strahl entspricht. Der Beweis ist so einfach, dass er nicht ausführlich gegeben zu werden braucht.

Schliesslich mag noch auf ein merkwürdiges Verhältniss der als Brennweiten des Systems (f und f^*) definirten Grössen aufmerksam gemacht werden. Es ist erstens klar, dass die obige Gleichung

$$l \frac{f}{p} = l^* \frac{f^*}{p^*}$$

auch für den Fall nur einer einzigen brechenden Fläche Geltung haben muss, in welchem Falle dann die Entfernungen f, p, f^* p^* sämmtlich von dem Scheitel der brechenden Fläche selbst nach beiden Seiten hin zu messen sind. Wenden wir sie auf die Brechung an der ersten Fläche unseres Systems an, indem wir die dabei geltenden Werthe der Brennweiten mit f_1 und f_2 bezeichnen. Ebenso sollen die jetzt an die Stelle von l, l^*, p und p^* tretenden Grössen mit l_1, l_2, p_1 und p_2 bezeichnet werden. Beziehen wir nun alle Punkte auf ein Koordinatensystem, dessen Ursprung O ein willkührlich gewählter Punkt der als x-Axe angenommenen Axe des Systems ist und dessen xy-Ebene diejenige Ebene ist, welche ausser der Axe noch den betrachteten Objektpunkt und mithin auch den Bildpunkt enthält. Gemäss diesen Verabredungen drücken sich die Grössen l_1, l_2 p_1 und p_2 in den Koordinaten x_1 y_1 des Objektpunktes und den Koordinaten x_2, y_2 des Bildpunktes folgendermaassen aus. Wenn die Abscisse des Scheitels der Fläche mit S bezeichnet wird $l_1 = y_1$ $l_2 = - y_2$ $p = S - x_1$ $p_2 = x_2 - S$ und es gilt also zwischen diesen Koordinaten einerseits die Gleichung

$$\frac{f_1}{S - x_1} - \frac{f_2}{S - x_2} = 1, \text{ andererseits } \frac{f_1 y_1}{S - x_1} = \frac{f_2 y_2}{S - x_2}.$$

Sind ξ_1 η_1 die Koordinaten eines anderen Objektpunktes und ξ_2 η_2 die des entsprechenden Bildpunktes bezogen auf denselben Ursprung und dieselben Axen dann gelten ebenso die Gleichungen

$$\frac{f_1}{S - \xi_1} - \frac{f_2}{S - \xi_2} = 1 \text{ und } \frac{f_1 \eta_1}{S - \xi_1} = \frac{f_2 \eta_2}{S - \xi_2}.$$

Wenn man jetzt von der ersten Gleichung in $x\,y$ die erste in $\xi_1\ \eta$ subtrahirt, so ergiebt sich

$$\frac{f_1\,(x_1 - \xi_1)}{(S - x_1)\,(S - \xi_1)} = \frac{f_2\,(x_2 - \xi_2)}{(S - x_2)\,(S - \xi_2)}.$$

Durch Multiplication der beiden anderen Gleichungen jener Paare erhält man

$$\frac{f_1^2\,y_1\,\eta_1}{(S - x_1)\,(S - \xi_1)} = \frac{f_2^2\,y_2\,\eta_2}{(S - x_2)\,(S - \xi_2)},$$

und wenn man endlich die beiden gefundenen Gleichungen durch einander dividirt so hat man

$$\frac{f_1\,y_1\,\eta_1}{x_1 - \xi_1} = \frac{f_2\,y_2\,\eta_2}{x_2 - \xi_2}.$$

Nun haben wir oben (S. 12) gesehen, dass die beiden Brennweiten eines Medienpaares ein Verhältniss zu einander haben, welches dem Brechungsindex n beim Uebergange vom ersten ins zweite maassgebend ist. Bekanntlich ist aber

$$n = \frac{v_1}{v_2}$$

wenn v_1 und v_2 beziehlich die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten des Lichtes im ersten und im zweiten Medium bedeuten also

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Durch Einsetzen dieses Werthes geht die letzte Gleichung über in

$$\frac{y_1\,\eta_1}{v_1\,(x_1 - \xi_1)} = \frac{y_2\,\eta_2}{v_2\,(x_2 - \xi_2)}.$$

Gehen wir nun zur Brechung an der zweiten Fläche über, indem wir die von der ersten gelieferten Bildpunkte für die zweite als Objektpunkte ansehen, so müssen offenbar die auf denselben Koordinatenursprung bezogenen Koordinaten x_3, y_3 ξ_3, η_3 des neuen Bildpunktes zu x_2, y_2 und ξ_2, η_2 in derselben Beziehung stehen wie diese zu x_1, y_1 und ξ_1, η_1 d. h. wenn man die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes im dritten Medium $= v_3$ setzt, muss die Gleichung gelten

$$\frac{y_2\,\eta_2}{v_2\,(x_2 - \xi_2)} = \frac{y_3\,\eta_3}{v_3\,(x_3 - \xi_3)}, \text{ also auch } \frac{y_1\,\eta_1}{v_1\,(x_1 - \xi_1)} = \frac{y_3\,\eta_3}{v_3\,(x_3 - \xi_3)}.$$

Wendet man dies Verfahren der Reihe nach auf sämmtliche Brechungen an, bezeichnet die auf Strahlen im letzten Medium bezüglichen Grössen mit dem Index * und lässt bei den Grössen, die sich auf Strahlen im ersten Medium beziehen, die Indices ganz fort, so kommt man auf eine Gleichung, welche eine direkte Beziehung zwischen den auf das erste und letzte Medium bezüglichen Grössen herstellt nämlich

$$\frac{y\,\eta}{v\,(x - \xi)} = \frac{y^*\,\eta^*}{v^*(x^* - \xi^*)}.$$

Hier sind x, y und ξ, η die Koordinaten zweier ganz beliebiger Objektpunkte, x^*, y^* und ξ^*, η^* die der entsprechenden Bildpunkte. Wir wählen nun den einen der beiden willkührlichen Objektpunkte in der ersten Hauptebene E, deren Abscissenwerth auch mit dem Buchstaben E bezeichnet werden soll, so dass $x = E$ wird. Seine Ordinate y sei h, dann sind offenbar die Koordinaten des Bildpunktes $x^* = E^*$ (wenn der Buchstabe E^* ebenfalls zur Bezeichnung des Abscissenwerthes der Ebene

E^* gebraucht wird) und $y^* = h$. Die Koordinaten ξ und η des zweiten Objektpunktes wollen wir nun durch die andern früher gebrauchten Grössen ausdrücken und haben dann

$$\xi = E - p,\ \eta = l \text{ und } \xi^* = E^* + p^*,\ \eta^* = -l\frac{p^* f}{p f^*}.$$

Dass die Ordinate des anderen Bildpunktes nicht $= -h$ sondern $= h$ zu setzen ist hat darin seinen Grund, dass wir sie nicht erst als ein l^* aus dem entsprechenden l berechnet haben. Durch Einsetzen dieser 8 Werthe in die Formel ergiebt sich

$$\frac{h\,.\,l}{v(E - E + p)} = -\frac{hl\frac{p^* f}{p f^*}}{v^*(E^* - E^* - p^*)} \text{ oder } vf = v^* f^*.$$

in Worten die beiden Brennweiten des Systems verhalten sich umgekehrt wie die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten des Lichtes im ersten und letzten Medium. Sind also diese beiden Medien ein und dasselbe, wie das bei Fernrohren, Mikroscopen etc. der Fall ist, wo die Strahlen aus Luft kommen und zuletzt wieder in Luft gehen, so sind die beiden Brennweiten einander gleich.

Bei einem der direkten Beobachtung überall zugänglichen Systeme kann man die Lage der optischen Cardinalpunkte auf der Axe leicht empirisch bestimmen. Die Aufgabe besteht offenbar darin die Entfernungen der 4 Punkte F, E, E^*, F^* von einem willkührlich gewählten Ausgangspunkt in der Axe zu finden. Man muss also für zwei Objektpunkte die Koordinaten x, y und ξ, η, sowie auch die Koordinaten ihrer Bildpunkte x^*, y^* und ξ^*, η^* bezogen auf den willkührlichen Ursprung und die Axe des Systems als x-Axe, indem man die Bildpunkte auf geeignet gestellten Schirmen zur Darstellung bringt. Man beachte nun, dass, wenn man die Abscissen der Cardinalpunkte durch die Buchstaben F, E, E^*, F^* wie sie selbst bezeichnet, die Gleichung

$$\frac{f}{p} + \frac{f^*}{p^*} = 1$$

für das erste Paar von konjungirten Punkten übergeht in

$$\frac{E - F}{E - x} + \frac{F^* - E^*}{x^* - E^*} = 1$$

und die Gleichung

$$l\frac{f}{p} = l^*\frac{f^*}{p^*} \text{ in } \frac{(E - F)\,y}{E - x} + \frac{(F^* - E^*)\,y^*}{x^* - E} = 0.$$

Zwei entsprechende Gleichungen ergeben sich für den zweiten Objekt- und Bildpunkt. Aus diesen 4 Gleichungen, in welchen x, y und x^*, y^* sowie ξ, η und ξ^*, η^* als empirisch bestimmt und mithin bekannt gelten, können die 4 gesuchten Grössen F, E, E^*, F^* berechnet werden. Wenn man mehr als zwei Objekt- und Bildpunkte

empirisch bestimmt ergeben sich einander gegenseitig kontrollirende Bestimmungen der gesuchten Grössen.

Wenn man in dem brechenden System nicht überall bildauffangende Schirme in genau messbaren Lagen aufstellen kann, so ist die zuletzt angedeutete empirische Ermittelung der Brenn- und Hauptpunkte unausführbar. Man kann aber ihre Lage durch Rechnung finden, wenn die maassgebenden Constanten des Systemes bekannt sind. Es sind dies offenbar folgende Grössen: erstens die Brechungsindices der einzelnen Medien, und zwar soll unter dem Brechungsindex eines Mediums derjenige verstanden werden, welcher beim Uebergang von Luft in dies Medium Geltung hat, so dass der Brechungsindex der Luft selbst (die gemeiniglich das erste Medium des brechendem Systems bildet) = 1 zu setzen ist. Diese Brechungsindices sollen der Reihe nach mit $n_0, n_1, n_2, \ldots . n^*$ bezeichnet werden. Zweitens sind es die Entfernungen der Scheitel der brechenden Flächen in der Axe von irgend einem darin gewählten Anfangspunkt. Diese Grössen wollen wir der Reihe nach mit S_1, S_2, ... S^* bezeichnen ihre Anzahl ist um 1 kleiner als die Anzahl der Grössen n. Drittens müssen bekannt sein die Grössen $C_1 - S_1$, $C_2 - S_2$, ... $C^* - S^*$, wo unter C_1, C_2 etc. die Entfernungen der Mittelpunkte der einzelnen Kugelflächen von dem willkührlich gewählten Anfangspunkte verstanden sind, Die Differenz $C_\mu - S_\mu$ ist also ihrem absoluten Werthe nach der Halbmesser der μ^{ten} Trennungsfläche. Die Differenz hat aber ein charakteristisches Vorzeichen und zwar das positive, wenn der Mittelpunkt hinter, das negative, wenn er vor dem Scheitel liegt, oder mit anderen Worten der Radius ist in die Rechnung mit positivem Zeichen einzuführen, wenn die ankommenden Strahlen auf die konvexe Seite der Fläche, mit negativem wenn dieselben auf die konkave Seite fallen. Sind alle diese Grössen gegeben, so ist offenbar das System optisch vollständig charakterisirt und es muss also auch möglich sein die Lage der Hauptpunkte und Brennpunkte in der Axe zu bestimmen, deren Existenz durch die früheren Betrachtungen erwiesen ist.

Die Art wie die Lage der Cardinalpunkte aus den gegebenen Constanten zu berechnen ist, hat GAUSS [1] in seinen berühmten „dioptrischen Untersuchungen“ sehr elegant entwickelt. Die Wiedergabe dieser Ent-

1 GAUSS, Dioptrische Untersuchungen, besonderer Abdr. aus den Abhandl. der Göttinger Gesellschaft. Göttingen 1841. Neuere Darstellungen der Berechnungsweise der Cardinalpunkte finden sich in verschiedenen monographischen Darstellungen: ZEHENDER, Anleitung zum Studium der Dioptrik des Auges. Erlangen 1856; MATTHIESSEN, Grundriss der Dioptrik etc. Leipzig 1877.

wicklung würde indessen hier zu viel Raum in Anspruch nehmem und kann um so eher hier unterlassen werden, als diese Entwickelung mit aller Ausführlichkeit und Strenge in dem in medicinischen Fachkreisen weit verbreiteten Handwörterbuch der Physiologie von LISTING[2] dargestellt ist. Wir begnügen uns daher damit die Rechnungsregel unbewiesen hier wiederzugeben. Man schreibe sich die charakteristischen Constanten des Systemes in folgender Ordnung nieder, wobei die Anzahl der Flächen m und also die der Medien $m + 1$ sein soll

$$\begin{array}{lll}
n_0 & & \\
 & C_1 - S_1 & \\
n_1 & & S_2 - S_1 \\
 & C_2 - S_2 & \\
n_2 & & S_3 - S_2 \\
 & C_3 - S_3 & \\
n_3 & & \\
\vdots & & \\
 & & S^* - S_{m-1} \\
n_{m-1} & C^* - S^* & \\
n^* & &
\end{array}$$

Hierauf bilde man daraus folgende Grössen

$$u_0 = -\frac{n_1 - n_0}{C_1 - S_1}$$

$$u_1 = -\frac{n_2 - n_1}{C_2 - S_2} \qquad t_1 = \frac{S_2 - S_1}{n_1}$$

$$u_2 = -\frac{n_3 - n_2}{C_3 - S_3} \qquad t_2 = \frac{S_3 - S_2}{n_2}$$

$$\vdots \qquad\qquad \vdots$$

$$u_{m-1} = -\frac{n_{m-1} - n_{m-2}}{C_{m-1} - S_{m-1}} \qquad t^* = \frac{S^* - S_{m-1}}{n_{m-1}}$$

$$u^* = -\frac{n^* - n_{m-1}}{C^* - S^*}$$

Diese Grössen sind hierauf in die Reihenfolge

$$u_0, , t, , u_1, , t_2, u_2, \ldots\ldots u_{m-1}, t^*, u^*$$

zu bringen und aus den Elementen dieser Reihe sind vier EULER'sche Kettenfunktionen folgendergestalt zu bilden. Im allgemeinen bildet sich eine solche aus einer beliebigen Reihe von Elementen, in dem mit dem Produkte der sämmtlichen Elemente multiplicirt wird eine Summe, welche aus einer Reihe von Summandengruppen gebildet ist. Die erste Gruppe ist die 1 die zweite besteht aus den reciproken Werthen der Produkte von je zwei benachbarten Elementen; die dritte Gruppe aus den reciproken Werthen der Produkte derjenigen Paare von Nennern der zweiten Gruppe die kein gemeinsames Element haben, die vierte aus den reci-

1 Wagner's Hwb. Bd. IV. Artikel Dioptrik des Auges.

proken Werthen der Produkte von je drei Nennern der zweiten Gruppe ohne gemeinsames Element in den ferneren Gruppen würden die Produkte von je 4, je 5 etc. jener Nenner als Nenner auftreten. Offenbar bricht die Bildung dieser Gruppen einmal von selbst ab, wenn nicht mehr die erforderliche Anzahl von Produkten ohne gemeinschaftliches Element zu finden ist.

Wenn wir eine solche Funktion einfach durch die eingeklammerte Reihe der Elemente bezeichnen, so hätten wir beispielsweise

$$(a) = a$$

$$(a, b) = ab\left(1 + \frac{1}{ab}\right)$$

$$(a, b, c) = abc\left(1 + \frac{1}{ab} + \frac{1}{bc}\right)$$

$$(a, b, c, d) = abcd\left(1 + \frac{1}{ab} + \frac{1}{bc} + \frac{1}{cd} + \frac{1}{abcd}\right)$$

$$(a, b, c, d, e) = abcde\left(1 + \frac{1}{ab} + \frac{1}{bc} + \frac{1}{cd} + \frac{1}{de} + \frac{1}{abcd} + \frac{1}{bcde} + \frac{1}{abde}\right)$$

$$\vdots \qquad \vdots$$

Für die Rechnung ist es indessen bequemer die Klammer aufzulösen, indem man das Produkt den sämmtlicheu Elemente mit 1 und den sämmtlichen Brüchen multiplicirt.

Nach diesem Schema bilde man aus den mit u und t bezeichneten Grössen folgende 4 Kettenfunktionen

$$g = (u_0, t_1, u_1, t_2, u_2 \;.\;.\;.\;.\; u_{m-1}, t^*)$$
$$h = \quad (t_1, u_1, t_2, u_2 \;.\;.\;.\;.\; u_{m-1}, t^*)$$
$$k = (u_0, t_1, u_1, t_2, u_2 \;.\;.\;.\;.\; u_{m-1}, t^*, u^*)$$
$$l = \quad (t_1, u_1, t_2, u_2 \;.\;.\;.\;.\; u_{m-1}, t^*, u^*)$$

Mit Hilfe dieser 4 Grössen berechnet sich die Entfernung, in welcher die erste Hauptebene hinter der ersten Trennungsfläche des Systems liegt

$$E - S_1 = -\frac{n_0 (1 - l)}{k}$$

und die Entfernung in welcher die zweite Hauptebene vor der letzten Fläche des Systems liegt

$$S^* - E^* = -\frac{n^* (1 - g)}{k}$$

sowie ferner die Entfernung, in welcher der erste Brennpunkt vor der ersten Trennungsfläche zu finden ist nämlich

$$S_1 - F = -\frac{n_0 \,.\, b}{k}$$

und die Entfernung, in welcher der zweite Brennpunkt hinter der letzten Trennungsfläche liegt

$$F^* - S^* = -\frac{n^* \,.\, g}{k}\,.$$

Die Lage der Knotenpunkte ergiebt sich dann leicht nach der oben gegebenen Definition derselben.

ZWEITES CAPITEL.

Anatomische Voraussetzungen.

I. Die Hüllen des Augapfels.

Wie aus der Anatomie bekannt, ist im Augenhintergrund eine Nervenausbreitung der Netzhaut zu finden, von welcher später gezeigt werden wird, dass sie den in der Einleitung gestellten Bedingungen entspricht. Vor ihr liegen 4 durchsichtige Medien, nämlich zunächst die sogenannte Glasfeuchtigkeit oder der Glaskörper, die Linse, die wässrige Feuchtigkeit und endlich die Hornhaut, welche im Augenlidspalt zu Tage tretend, den Lichtstrahlen aus der Luft den Eintritt gestattet, so dass dieselben durch sie, die wässrige Feuchtigkeit, die Linse und den Glaskörper zur Netzhaut vordringen können, indem sie beim Uebergang von einem Medium zum andern im Allgemeinen eine Brechung erleiden.

Die durchsichtigen Körper des Auges sind umschlossen von drei grösstentheils einander unmittelbar anliegenden Hüllen. Die äusserste Hülle ist die harte Haut des Auges tunica sclerotica, von welcher die schon erwähnte durchsichtige Hornhaut selbst den vordersten Abschnitt bildet. Die Sclerotica ist aus weissem ziemlich undurchsichtigem Sehnengewebe gebildet und durchschnittlich etwa 0,5 mm. dick. Sie geht in die Hornhaut stetig über, deren Struktur jedoch von der ihrigen wesentlich abweicht, wie aus der Histiologie bekannt ist. Die äussere Oberfläche der Sclerotica ist annähernd eine Kugeloberfläche, doch ist die Abweichung schon mit dem Augenmaasse bemerkbar. Hinten, der Hornhaut gegenüber, ist nämlich die Sclerotica etwas abgeplattet, so dass die grössten Durchmesser von etwa 23—26 mm. in die Aequatorialebene fallen. Es sei hier ein für allemal bemerkt, dass wir zur Orientirung am Augapfel die geographische Bezeichnungsweise anwenden wollen. Diejenige Gerade, welche vom Hornhautscheitel zu dem von ihm am weitesten abstehenden Punkte der Oberfläche geht, und um welche die Theile des Auges sehr annähernd symmetrisch liegen, heisse die „Axe des Auges“, ihre Enden die „Pole“. Jede durch die Axe gelegte Ebene heisse eine „Meridianebene“ des Auges, und die im Mittelpunkt der Axe zu ihr senkrechte Ebene die „Aequatorialebene“.

Die Hornhautfläche bildet geometrisch nicht die stetige Fort-

setzung der Scleroticaoberfläche, sondern ist merklich convexer, was man schon am Auge des Lebenden sehen kann. Daher kommt es, dass, trotz der Abplattung am hinteren Pole, doch die Axe von Pol zu Pol gemessen, etwa gerade so lang ist wie der grösste Aequatorialdurchmesser, nämlich 23—26 mm.

Die Hornhaut ist auf ihrer Vorderfläche mit einem Plattenepithel bekleidet, das die Fortsetzung des Epithels ist, welches den ganzen Conjunktivasack auskleidet. Die hintere Fläche der Hornhaut ist noch mit einer besonderen Membran, der sogenannten membrana Descemetii, überzogen, welche sich durch ihre Widerstandsfähigkeit gegen Lösungsmittel, besonders kochendes Wasser, auszeichnet. Die hintere Seite der Descemet'schen Haut ist mit einer Schicht von platten Epithelzellen belegt.

Die zweite Hülle des Augapfels bildet die sogenannte tunica uvea. Sie ist ausgezeichnet einerseits durch grossen Gefässreichthum und andererseits durch überall eingelagerte Pigmentzellen, die auf der inneren Oberfläche eine zusammenhängende Schicht bilden. Endlich enthält sie an gewissen noch näher zu bezeichnenden Stellen auch glatte Muskelfasern. Alle diese Gewebe sind in ein bindegewebiges Lager eingebettet. Die tunica uvea bildet nicht wie die Sclerotica mit der Hornhaut eine vollständig geschlossene Blase, sondern sie hat vorn ein rundes Loch, die Pupille genannt, dessen Mittelpunkt in der Axe liegt.

Der hintere Abschnitt der uvea, auch tunica chorioidea genannt, liegt der sclerotica in ihrer ganzen Ausdehnung unmittelbar an, ohne jedoch mit ihr verwachsen zu sein. Der vordere Abschnitt, die sogenannte Iris, liegt nicht ebenso der Hornhaut unmittelbar an, sondern tritt hinter dieselbe zurück, wodurch ein freier Raum, die Augenkammer, gebildet wird, in welcher sich die wässrige Feuchtigkeit befindet.

Längs des Parallelkreises, wo die Chorioidea in die Iris übergeht, also entsprechend der Grenze zwischen Sclerotica und Hornhaut, ist die uvea mit der äusseren sehnigen Hülle des Auges verwachsen. Diese Verwachsung ist wesentlich dadurch bedingt, dass an einem mit dem Rande der membrana Descemetii zusammenhängenden Netzwerk elastischer Fasern, welches hier von der Grenze zwischen Hornhaut und Sclerotica ausgeht, glatte Muskelfasern entspringen, die in Meridianrichtungen als Theile der chorioidea weiter laufen und eine stetige Schicht an deren Oberfläche bilden, welche bis gegen den Aequator reicht. Diese Muskelschicht wird der Brücke'sche Muskel oder m. tensor chorioideae genannt. In der vorderen

Parthie dieses Muskels finden sich auch cirkuläre Elemente, welche indessen häufig nach hinten in Meridianrichtungen abbiegen. Dieselbe Zone der chorioidea, welche aussen durch diesen Muskel gebildet wird, erscheint auf der inneren Seite halskrausenartig gefaltet; und zwar laufen diese Falten, plicae ciliares genannt, ungefähr 80 an Zahl, in Meridianrichtungen gegen den Aequator zu flach aus, während sie sich nach vorn höher erheben, so dass ihre Enden einen Kranz von zottenartigen Vorsprüngen bilden, welche den Linsenrand umgeben.

Der vordere Abschnitt der uvea, die Iris, enthält durchweg viel glatte Muskelfasern. Ein Theil derselben bildet einen ringförmigen Wulst um die Pupille herum, die Zusammenziehung dieser Fasern führt zu einer Verengerung des Loches, man bezeichnet daher diesen Muskelring, der auch eine besondere Innervation hat, als einen besonderen Muskel unter dem Namen des „sphincter pupillae“. Von demselben ringförmigen Netzwerke elastischer Fasern, welches den nach hinten ziehenden Bündeln des musculus tensor chorioideae zum Ursprung dient, entspringen Muskelfasern, welche im Allgemeinen in radialen Richtungen in der Iris zum Rande der Pupille verlaufen. Da sie an der harten Haut des Auges ringsum feste Ursprungspunkte haben, so müssen sie durch ihre Verkürzung die Pupille erweitern, daher man dieses System von Muskelfasern unter dem Namen des „dilatator pupillae“ zusammenfasst.

Die dritte Lage der Umhüllung des Augapfels wird von der Ausbreitung des Sehnerven gebildet. Dieser Nerv durchbohrt bekanntlich ein wenig nasenwärts vom hinteren Pol des Auges die sclerotica und chorioidea und geht sofort in eine flächenartige Ausbreitung die sogenannte Netzhaut (tunica retina) über, welche sich der inneren Fläche der chorioidea unmittelbar anlegt, ohne aber mit ihr irgendwie verwachsen zu sein. Diese, hinten wo sie am dicksten ist, etwas über $^2/_{10}$ mm. dicke Membran ist in sehr verwickelter Weise aus nervösen und bindegewebigen Elementen zusammengesetzt, welche letztere ein Lager bilden, um die zarten nervösen Elemente in der für ihre Verrichtung nöthigen Stellung sicher zu erhalten. Da der Bau der Retina erst in dem Abschnitte von den Lichtempfindungen sein physiologisches Interesse erhält, so mag derselbe vorläufig unerörtert blieben. Es genügt hier zu bemerken, dass die nervösen Elemente in der Netzhaut von der Eintrittstelle des Sehnerven an nach vorn immer spärlicher werden und etwas über den Aequator hinaus ganz aufhören und zwar auf der Zone, auf welcher in der chorioidea die Ciliarfalten sich zu erheben anfangen. Da die Aenderung in der Be-

schaffenheit der Netzhaut hier schon dem blossen Auge bemerklich ist und zwar der beginnenden Faltung entsprechend in einer leichtgezackten Grenzlinie, so hat man dieselbe als „ora serrata retinae“ bezeichnet. Darüber hinaus setzt sich von der Netzhaut wesentlich nur noch ihre innerste glashelle, anscheinend structurlose Schicht, die sogenannte „membrana limitans interna“ fort und bildet, den Ciliarfalten innen folgend, den Ciliartheil der Netzhaut. An den freien Enden der Ciliarfalten angelangt, geht diese Fortsetzung der Netzhaut mit anderen Gebilden eigenthümliche Verbindungen ein, welche alsbald bei der Beschreibung der Linse zu erwähnen sind. Die Netzhaut hat ihr eigenes von dem der chorioidea unabhängiges Gefässsystem, das durch die Verzweigungen einer kleinen im Innern des Sehnerven eintretenden Arterie, der arteria centralis retinae gebildet wird.

II. Die durchsichtigen Körper des Augapfels.

Der von der beschriebenen, aus drei Schichtsystemen bestehenden Hülle umschlossene Hohlraum ist nun von den durchsichtigen Körpern des Auges in folgender Art ausgefüllt: Vorn hinter der Hornhaut, den Raum zwischen ihr und der Iris einnehmend, findet sich, wie schon gesagt, der humor aqueus. Er ist wesentlich Wasser, in welchem die Salze des Blutserums nebst Spuren organischer Stoffe gelöst sind.

Der bei weitem grössere, hintere, von der sclerotica umgebene Abschnitt des Augapfels ist angefüllt mit dem sogenannten „Glaskörper“ (humor vitreus). Dieser ist zwar aus festen Lamellen und dazwischen eingeschlossenen Flüssigkeitsmengen eigenthümlich aufgebaut. Doch hat diese Struktur für die physiologische Optik kein Interesse und kann daher hier unerwähnt bleiben. Optisch wirkt der Glaskörper wie ein homogener durchsichtiger Körper. Er ist im Ganzen noch umschlossen von einer strukturlosen Membran der Glashaut, welche der membrana limitans anliegt und längs der ora serrata mit ihr verklebt ist.

Zwischen Glaskörper und wässriger Feuchtigkeit ist noch ein durchsichtiges Gebilde eingeschaltet, das mit seiner Vorderfläche der Iris wenigstens am Pupillarrande unmittelbar anliegt, und das seiner linsenförmigen Gestalt den Namen der Krystalllinse, lens crystallina, verdankt. Die Linse ist etwa von butterartiger Konsistenz, besteht aber, ähnlich einer Zwiebel, aus einer Unzahl von leicht trennbaren Schichten, deren Anordnung in Fig. 4 zu sehen ist, wie sie sich auf

einem ebenen Schnitte durch die Axe etwa zeigen würden. Jede Schicht besteht aus Fasern, welche in der Schicht im allgemeinen radial verlaufen, jedoch gegen den Mittelpunkt konvex umbiegen. Die Fasern jeder Schicht bilden so 5 hyperbolische Büschel mit einigen Nebenbüscheln, wie in Fig. 5 zu sehen ist.

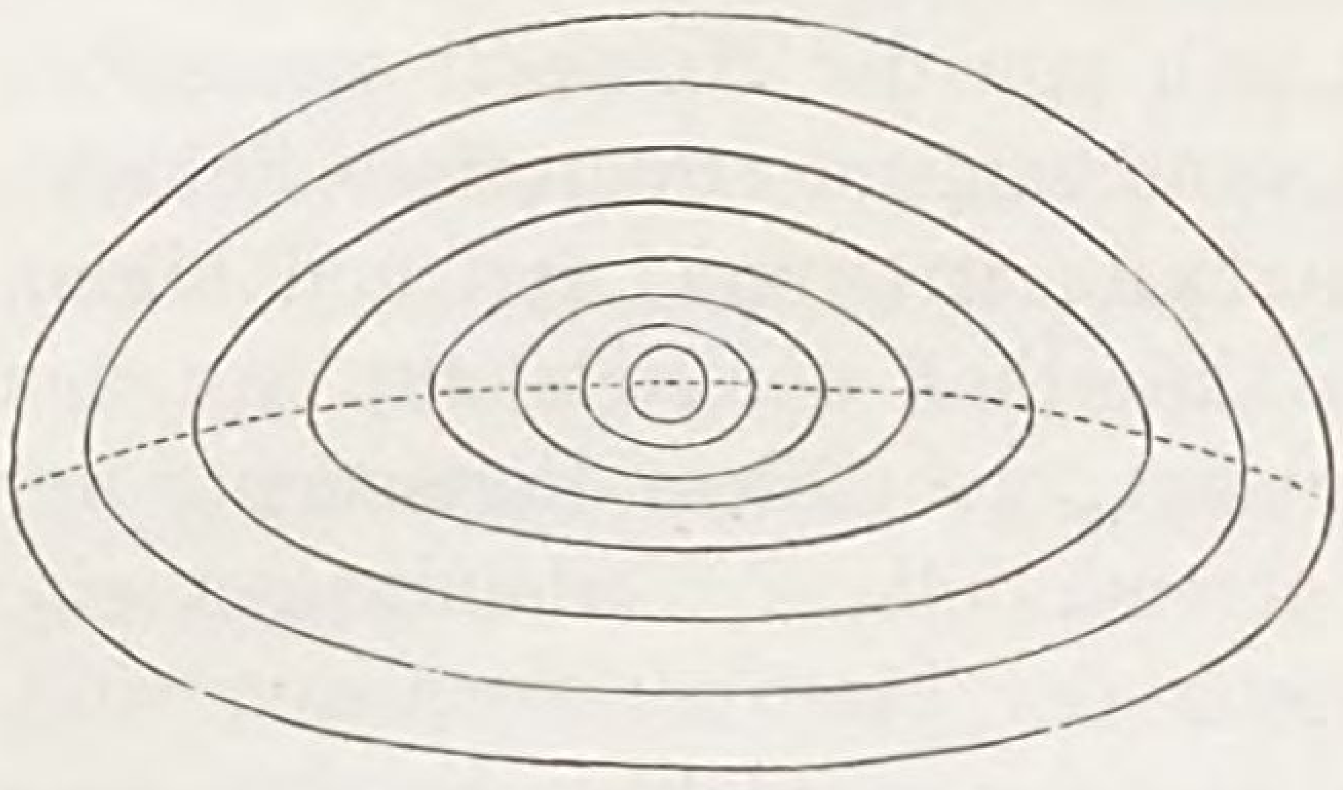


Fig. 4.

Die Linse ist eingeschlossen in eine Kapsel von der Struktur der Glashaut, mit welcher sie auch längs eines Parallelkreises auf der hinteren Fläche verwachsen ist. Es setzt sich ferner an die Linsenkapsel ringsum noch ein ebenfalls strukturloses membranöses Gebilde fest, welches sich zwischen den ganzen Ciliartheil der Netzhaut und die entsprechende Parthie der Glashaut einschiebt. Dies beim Accommodationsvorgang wichtige Gebilde wird

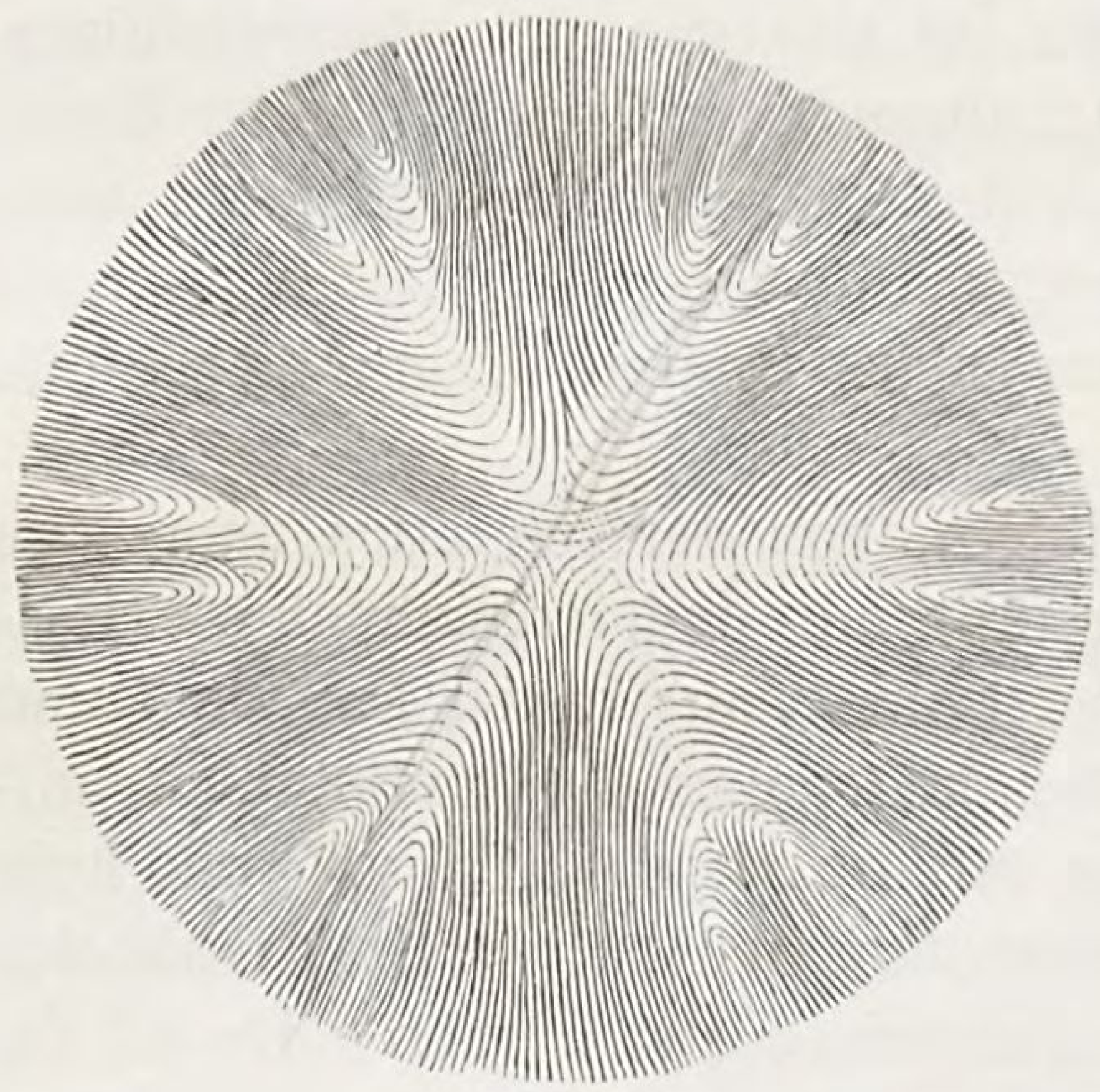


Fig. 5.

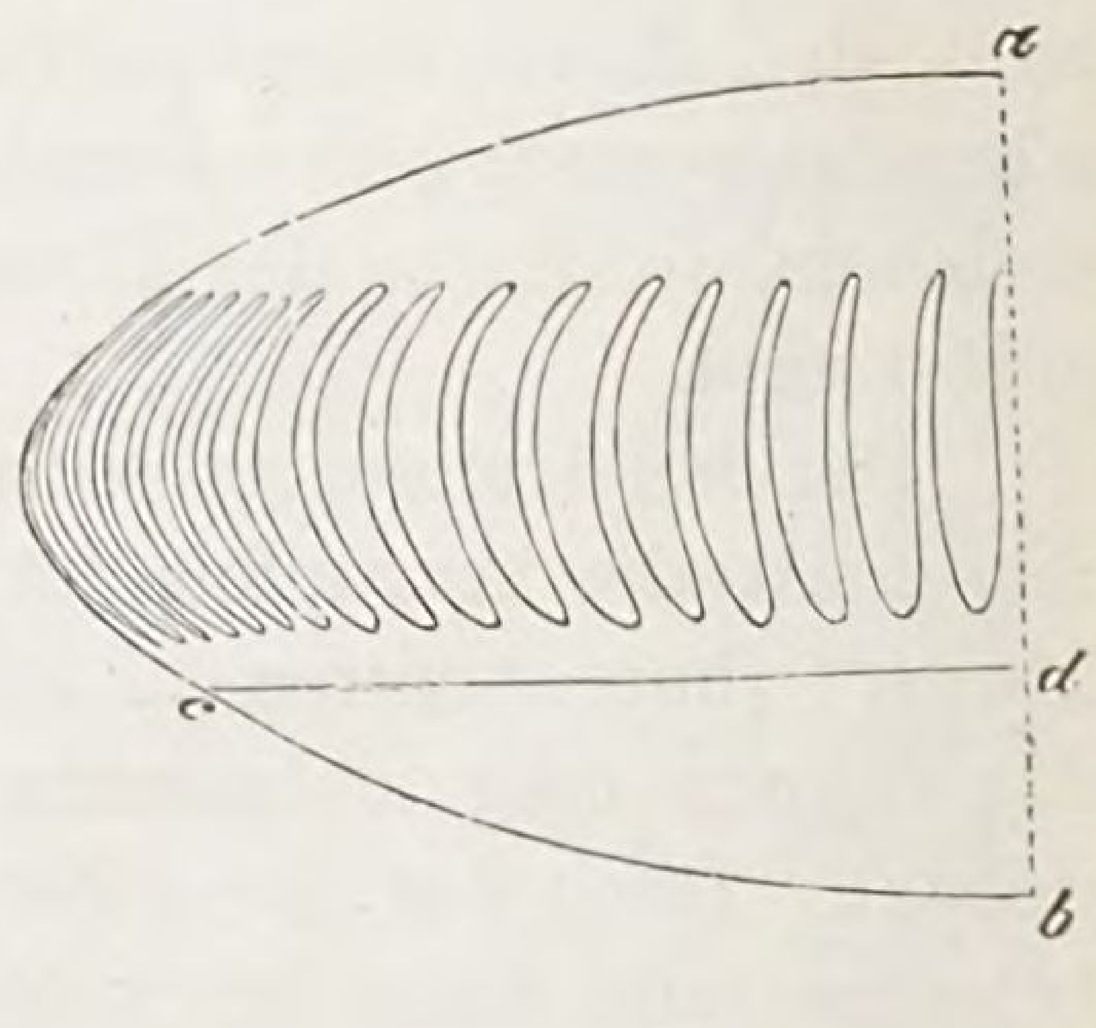


Fig. 6.

Zonula Zinnii genannt und von manchen Anatomen als ein äusseres Blatt der Glashaut angesehen, mit der es jedenfalls, sowie anderseits mit der membrana limitans retinae längs der ora serrata verwachsen ist. Die Zonula Zinnii folgt wie die membrana limitans den Faltungen der chorioidea. Während dann aber die limitans von den freien Enden der Ciliarfalten auf die hintere Fläche der Iris überzutreten und sich da zu verlieren scheint, springt die Zonula, wie schon angedeutet, von den Ciliarfalten auf die Linsenkapsel über, um mit dieser zu ver-

wachsen längs einer der Ciliarfaltung entsprechend wellig gekrümmten Linie. Eine Anschauung von dieser Ansatzlinie giebt die Fig. 6, in welcher ausserdem die Ansatzlinie der eigentlichen Glashaut *cd* zu sehen ist.

Die sämmtlichen, vorstehend in Erinnerung gebrachten, optisch bedeutsamen anatomischen Verhältnisse übersieht man gut in Fig. 7.

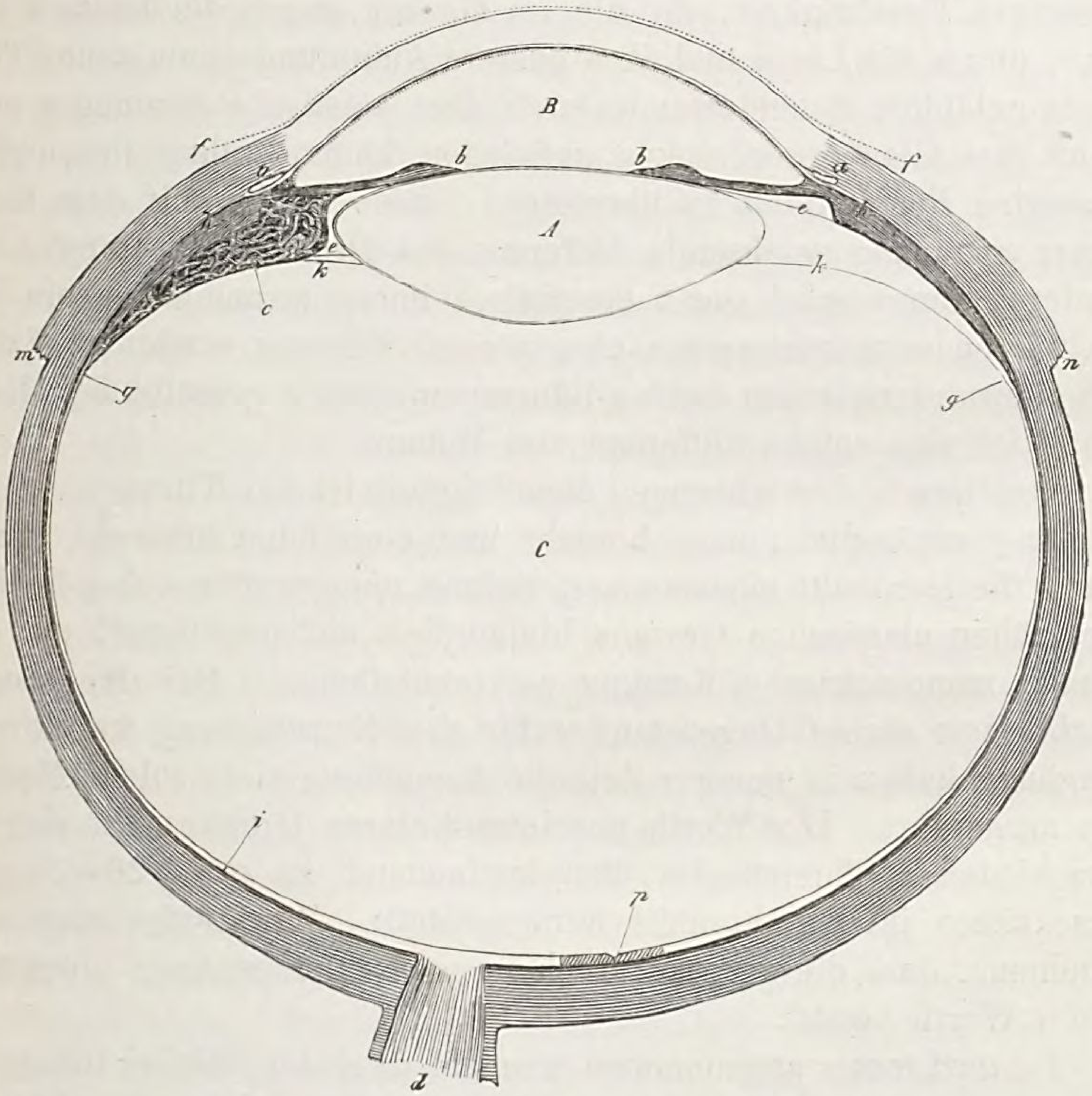


Fig. 7.

Sie stellt einen wagrechten Meridianschnitt eines rechten Auges von oben betrachtet dar und ist der physiologischen Optik von Helmholtz entnommen. Einer besonderen Erklärung bedarf die Figur nach dem Vorstehenden nicht mehr, nur die eine Bemerkung ist noch nöthig, dass angenommen ist der Schnitt treffe rechts die Einsenkung zwischen zwei Ciliarfalten links aber den First einer Falte. Dem entsprechend springt die Zonulae rechts an einen Punkt der Vorderfläche, links an einen Punkt der Hinterfläche der Linsenkapsel.

III. Der intraokulare Druck.[1]

Bei dem annähernd oder vollkommen flüssigen Aggregatzustande des Inhaltes des Augapfels, mit Ausnahme der Linse, kann man füglich nach dem hydrostatischen Drucke fragen, unter welchem dieser Inhalt stehe. Er braucht freilich nicht überall nothwendig gleich zu sein. Vielmehr kann der Druck im Glaskörper höher sein als in der wässrigen Feuchtigkeit, da die im Ganzen gegen die letztere konvexe, durch die Linse und ihre äussere Anheftung (zonula und Glashaut) gebildete Scheidewand durch ihre elastische Spannung einen Theil des Glaskörperdruckes aufwiegen könnte, ohne ihn auf die wässerige Feuchtigkeit zu übertragen. Eine solche mit dem Grade dieser Spannung wachsende Differenz des Druckes im hinteren und vorderen Raume wird sogar theoretisch immer anzunehmen sein. Jedoch kann man keineswegs eine grosse Differenz erwarten, da die Scheidewand zwischen beiden Räumen nur flach gewölbt ist. Beobachtet ist eine solche Differenz von Weber.

Der Druck der wässrigen Feuchtigkeit ist bei Thieren direkter Messung zugänglich, man braucht nur eine feine konische Canüle durch die Hornhaut einzustossen, welche ohne weiteres das Loch in dem zähen elastischen Gewebe hinlänglich dicht schliesst, um eine genaue manometrische Messung zu ermöglichen. Bei der grossen Wichtigkeit dieses Gegenstandes für die Beurtheilung krankhafter Vorgänge haben in neuerer Zeit die Augenärzte viele solche Messungen ausgeführt. Der Werth des intraokularen Druckes hat sich bei verschiedenen Thierspecies übereinstimmend zu etwa 20—30 mm. Quecksilber im Durchschnitt herausgestellt. Wir dürfen also wohl annehmen, dass diese Grösse auch im menschlichen Auge einen ähnlichen Werth besitzt.

Es darf ferner angenommen werden, dass der flüssige Inhalt der inneren Augenräume sich ebenso wie alle anderen thierischen Flüssigkeiten in fortwährenden, wenn auch langsamen Strömen befindet, dass also insbesondere z. B. von dem Kammerwasser beständig etwas nach aussen abgegeben und durch neues ersetzt wird, so dass der

1 In der Darstellung dieses Gegenstandes von mehr pathologischem Interesse folge ich im Ganzen Leber, Handbuch der gesammten Augenheilkunde. Leipzig 1876 und will nach ihm noch folgende Abhandlungen citiren, die mir zum grössten Theil auch selbst vorliegen: C. Weber, Nonnullae disquisitiones etc. Inauguralabhandlung. Marburg 1850; Adamük, Med. Centralblatt 1866. No. 36 u. 1867. No. 28 und Sitzungsber. der Wiener Akad. 1869. Febr.; Grünhagen & v. Hippel, Berliner klin. Wochenschr. 1866. No. 24; Zeitschr. f. rat. Med. 1866. Bd. 28; Arch. f. Ophthalmol. Bd. 14 und 15; Schwalbe, Lymphräume des Auges. Arch. f. mikrosk. Anat. Bd. 6; Leber, Arch. f. Ophthalmol. Bd. 19.

konstante Werth des intraokularen Druckes steigen müsste, wenn die Abflussbedingungen ungünstiger oder die Zufuhrbedingungen günstiger werden und vice versa.

Was nun die Abzugswege des Kammerwassers und der Tränkungsflüssigkeit des Glaskörpers betrifft, so ist die auf den ersten Blick nächstliegende Annahme, es seien die Lymphwege, höchst unwahrscheinlich, wenigstens konnten LEBER und SCHWALBE von der Augenkammer aus die Lymphgefässe nicht injiciren. Auch sieht man diffusionsunfähige Farbstoffe (z. B. Berlinerblau), die man ins Kammerwasser bringt, nie sich in die umgebenden Gefässe verbreiten, während diffusionsfähige, wie Carmin, in die Venen am Rande der Hornhaut eindringen. Die Augenkammer ist also weder mit dem Lymph- noch mit dem Blutgefässsystem in offenem Zusammenhange, sondern sie stellt einen vollständig abgeschlossenen Raum dar, aus welchem nur durch Filtration Flüssigkeit entweichen kann. Es ist bemerkenswerth, dass keine Filtration durch die Hornhaut stattfindet, deren hinteres Epithel offenbar für Wasser undurchdringlich ist. Wenn nämlich dies Epithel entfernt wird, trübt sich die Hornhaut und quillt auf, und sie trocknet ein, wenn man ihre vordere Fläche vor der Benetzung mit Thränen und Bindehautsekret schützt.

Der Ersatz für das abfiltrirte Wasser geschieht natürlich ebenfalls durch Filtration aus den Blutgefässen, in deren arteriellem und wohl auch kapillarem Theile der Druck höher ist als der intraokulare. Dass ein solcher Ersatz während des Lebens wirklich fortwährend stattfindet, beweist die Thatsache, dass ins Blut gebrachte Salze (wie Blutlaugensalz oder Sublimat) schon nach etwa 20′ im Kammerwasser nachzuweisen sind. Im Glaskörper hat man sie nicht auffinden können, wohl weil hier der Ersatz der Flüssigkeit langsamer geschieht. Der Ort, wo hauptsächlich Wasser aus den Blutgefässen in die Augenkammer ausschwitzt, sind offenbar die Ciliarfortsätze und die ebenfalls sehr gefässreiche hintere Fläche der Iris. Wenn nämlich durch Verwachsung des Pupillarrandes diese Gefässe von der vorderen Augenkammer abgesperrt sind, so wird dieselbe allmählich leer und die Linse rückt bis zur Hornhaut vor.

Wird die Augenkammer entleert, so ersetzt sich ihr Inhalt sehr schnell, woraus aber auf die Geschwindigkeit des Stromes unter normalen Verhältnissen nicht geschlossen werden kann, denn nach Entleerung des Kammerwassers ist der Druck daselbst Null und also der Ueberdruck in den Gefässen bedeutend grösser, was die Filtration beschleunigen muss. Auch ist in diesem Falle die Beschaffenheit des Filtrates eine andere, indem dasselbe reicher an Eiweiss

wird, welches im normalen Kammerwasser nur in minimen Spuren vorhanden ist.

Der intraokulare Druck muss offenbar in jedem Augenblicke gleich sein dem Drucke des Blutes in den Gefässen, vermindert um den Betrag, welchem die Spannung der Wände Gleichgewicht hält. Hieraus folgt, dass jede Ursache, welche den Druck in irgend welchem Theile des Blutgefässsystemes im Innern des Auges steigert, ohne zugleich die Spannung der Gefässwände zu vermehren, auch den intraokularen Druck steigern muss. Dies muss schon von den Schwankungen des arteriellen Blutdruckes durch den Puls gelten. In der That hat K. Weber, der in Gemeinschaft mit Ludwig dies Gebiet zuerst betreten hat, vom Pulse sowie auch von der Respiration abhängige Schwankungen des intraokularen Druckes beobachtet. Bei Anwendung sehr enger Manometer, wie sie zu genauen Messungen hier nur anwendbar sind, zeigen sich indessen die Pulsschwankungen meist gar nicht. Jedesfalls sind diese Schwankungen ausserordentlich klein und müssen es auch sein, weil rasche bedeutende Druckschwankungen wohl dem feinen Nervenapparate der Netzhaut gefährlich werden könnten. Wahrscheinlich ist dafür gesorgt, indem das Blut ins Innere des Auges durch sehr enge und verhältnissmässig lange Arterienästchen geführt wird, in denen die Pulswelle zum grössten Theil erlischt.

Alle Ursachen, die den mittleren Druck in der Carotis auf die Dauer erheblich ändern, haben eine sehr merkliche Wirkung auf den intraokularen Druck. So fand Adamük, dass bei Katzen und Hunden der Druck im Auge um 6—8 mm. sank, wenn die Carotis derselben Seite verschlossen wurde. Grünhagen und v. Hippel sowie A. Weber wiesen nach, dass Verschliessung der Aorta descendens den intraokularen Druck bedeutend steigert. Die ersteren sahen ferner denselben um 10—16 mm. steigen bei Reizung des Halsmarkes. Ebenso steigt auch der intraokulare Druck, wenn durch Erstickung der Blutdruck im allgemeinen gesteigert wird. Adamük hat nachgewiesen, dass Verschliessung der aus dem Bulbus oculi austretenden venae vorticosae eine Steigerung des Kammerwasserdruckes um 90 mm. bewirken kann. Dies ist begreiflich, da ja bei diesem Eingriffe der Druck in den Venen innerhalb des Bulbus die Höhe des arteriellen Druckes annehmen muss, und die Spannung der Venenwände doch kaum einen namhaften Werth besitzen wird. Dahingegen steigert Verschliessung der grossen Halsvenen den intraokularen Druck nicht merklich. Dies wird verständlich, wenn man bedenkt, dass schon im normalen Zustande der Druck in den Venen

des Bulbus an der Austrittsstelle mindestens dem intraokularen Drucke gleich sein muss, da ja sonst die Venen im Innern komprimirt werden würden. Bis zu diesem Betrage aber von etwa 30 mm. müsste also der Druck im ganzen Gebiete der vena jugularis erst steigen, ehe eine Steigerung des intraokularen Druckes selbst durch Verschliessung der Halsvenen zu erwarten wäre.

Sehr merkwürdig, aber noch nicht ganz aufgeklärt, sind die Beziehungen des n. sympathicus und trigeminus zum intraokularen Drucke. Reizung dieser beiden Nerven hat nämlich Steigerung desselben zur Folge, während doch von der Reizung des Halssympathicus als Wirkung eher eine Herabsetzung zu erwarten wäre, da ja dadurch voraussichtlich die Spannung der Gefässwände im Bulbus gesteigert wird. Verschiedene Forscher suchen die Steigerung des Druckes bei diesen Nervenreizungen zu erklären, indem sie annehmen, dass dadurch die Absonderungsbedingungen des Augenwassers günstiger würden. Ein strenger Beweis ist indessen für diese Annahme nicht geliefert.

Endlich mag noch erwähnt werden, dass Einträufeln von Atropin eine geringe Minderung, Einträufeln von Nicotin eine Steigerung des intraokularen Druckes bewirkt.

IV. Umgebung des Augapfels.

Der Augapfel liegt in der sogenannten Augenhöhle. Da sie etwa die Gestalt einer vierseitigen Pyramide hat, so bleiben zwischen ihren Wänden und dem kugelförmigen Augapfel grosse Lücken. Diese sind ausgefüllt mit fetthaltigem Bindegewebe, durch welches die verschiedenen für den Augapfel bestimmten Nerven und Gefässe hinziehen, vor Allem der durch das Foramen opticum an der Spitze der Augenhöhlenpyramide in sie eintretende nervus opticus, an dem der Augapfel wie an seinem Stiel hängt. Vermöge des lockeren Zusammenhanges der dem Augapfel nächst anliegenden Bindegewebsschichten kann derselbe auf dem Fettpolster gleiten wie ein kugelförmiger Gelenkkopf in seiner Gelenkpfanne. Man kann ihm somit eine arthrodische Beweglichkeit zuschreiben, wie in dem Abschnitte über die Augenbewegungen genauer auszuführen ist.

Bewerkstelligt werden die Bewegungen des Augapfels durch 3 Paare von Muskeln. Die beiden Muskeln jedes Paares sind sehr annähernd Antagonisten. Das erste Paar rectus internus und externus, nahezu in der wagrechten Meridianlinie des Auges verlaufend, drehen es um eine ziemlich senkrechte Axe nach innen und nach

aussen. Das zweite Paar rectus superior und inferior, ungefähr in einer senkrechten Ebene, deren Grundriss auf dem Horizont von hinten und innen nach vorn und aussen gerichtet ist, drehen um eine wagrechte von aussen und hinten nach innen und vorn gerichtete Axe auf- und abwärts. Die Zugrichtungen des dritten Paares musculus obliquus superior und inferior liegen gleichfalls in einer senkrechten Ebene, deren Spurlinie am Horizont von hinten und aussen nach vorn und innen gerichtet ist, sie drehen also auch in entgegengesetztem Sinne um eine wagrechte Axe, die von hinten und innen nach vorn und aussen gerichtet ist. 5 der genannten Muskeln, nämlich die 4 recti und der obliquus superior, entspringen in der Umgebung des Sehnerveneintrittes dicht beieinander. Die 4 recti ziehen von da ziemlich geradlinig die Kantenrichtungen einer 4seitigen Pyramide einhaltend zu ihren Ansatzstellen am Bulbus, die ungefähr auf demselben Parallelkreis etwas vor dem Aequator liegen. Der obliquus superior zieht vom Ursprung nach dem oberen inneren Winkel des Augenhöhlenrandes und hier geht seine Sehne durch eine am Stirnbein befestigte sehnige Schlinge (die trochlea), in der sie fast ohne Reibung gleiten kann. Von der trochlea zieht die Sehne des obliquus superior scharf abknickend nach hinten und aussen unter dem musculus rectus superior durch, um sich als platter Streif an der hinteren Bulbushälfte zu inseriren. Der obliquus inferior entspringt am inneren unteren Winkel des Augenhöhlenrandes und erreicht ohne plötzliche Richtungsänderung seinen Ansatz am äusseren hinteren Theile des Bulbus, von ihm bei der Ueberkreuzung durch den rectus inferior getrennt.

Der vordere, nahezu die Hälfte bildende Abschnitt des Augapfels, welcher über das Fettpolster der Augenhöhle hervorragt, ist zeitweise ganz, zeitweise zum Theil, bedeckt von den sogenannten Augenlidern. Es sind dies zwei verschiebbare Platten, bestehend aus einer festen bindegewebigen (nicht knorpeligen) Grundlage, dem Tarsus, welcher aussen von einer Fortsetzung der Gesichtshaut überzogen ist, innen von Schleimhaut, welche sich auf den bulbus oculi umschlägt und den aus dem Fettpolster vorragenden Abschnitt der sclerotica überzieht. Sie wird daher als Bindehaut tunica conjunctiva bezeichnet. Die äussere Gestalt des Augenlidspaltes und der Lider selbst in ihren verschiedenen Stellungen sind aus der Anschauung am Lebenden allgemein bekannt. In die beiden Tarsi sind etwa je 20 Drüsenschläuche mit seitlich anhängenden Läppchen eingelagert, die im Ganzen eine zu dem Lidrande nahezu senkrechte Richtung einhalten. Das Sekret dieser Tarsaldrüsen ist eine dickflüssige Fett-

emulsion, welche sie an den Lidrand ergiessen. Zwischen den Ausführungsgängen befinden sich die Wurzeln von etwa 100 starken Haaren in jedem Lide, der sogenannten Augenwimpern.

Die inneren sowohl als äusseren Enden der Tarsi sind durch ziemlich starke bandartige Bindegewebsstränge an die dem inneren und äusseren Augenwinkel gegenüberliegenden Stellen des knöchernen Augenhöhlenrandes angeheftet. Es entsteht so das innere Augenlidband, welches die inneren Enden der tarsi oder den inneren Augenwinkel an den Stirnfortsatz des Oberkiefers stark befestigt, und das etwas schwächere Augenlidband vom äusseren Augenwinkel nach dem Jochbeinrand. Die Tarsi sind übrigens ringsum durch eine Fascie an den Augenhöhlenrand angeheftet.

Die Augenlider werden bewegt durch einen aus verschiedenen Theilen zusammengesetzten Muskelapparat. An den oberen Rand des tarsus setzt sich der levator palpebrae superioris, er entspringt von der Umgebung des foramen opticum wie der m. rectus superior, über dem er in seiner ganzen Ausdehnung hinzieht, und wie dieser wird er auch vom nervus oculomotorius innervirt. Wie aus der Lage dieses Muskels zu schliessen ist und sein Name besagt, hat er die Aufgabe, durch seine Zusammenziehung das obere Augenlid zu heben und so zur Oeffnung des Augenlidspaltes mitzuwirken. Die dabei stattfindende Senkung des unteren Augenlides wird wesentlich durch die Schwere bewirkt, vielleicht jedoch zum Theil auch durch Zusammenziehung gewisser Muskelbündel, welche im Ganzen ähnlich verlaufen wie der Schliessmuskel der Augenlidspalte. Als solcher dient eine sehr dünne Muskelschicht, welche dicht unter der Haut beider Augenlider liegt und deren Fasern den Augenlidspalt in flachen Bogen umziehen. Jedoch gehen die Fasern des oberen Lides nicht an den Augenwinkeln in die des unteren über, so dass der Muskel nur uneigentlich dem äusseren Ansehen nach als „Ringmuskel“ (orbicularis palpebrarum) bezeichnet wird. Es entspringen vielmehr die Fasern des oberen sowohl als die des unteren Lides an dem inneren Lidband und setzen sich an das äussere fest. Indem sich die nach der Lidspalte konkaven Bogen bei der Contraktion in gerade Linien zu verwandeln streben, müssen sie die beiden Augenlider zusammen schieben und mithin den Lidspalt schliessen.

Diejenigen von den Anatomen zum Orbicularis gezählten Muskelfasern, welche oben sowohl als unten hart am freien Lidrande hinziehen, haben einen anderen Ursprung als die in weiteren Bogen verlaufenden. Sie entspringen nämlich etwas tiefer hinten in der Augenhöhle an der crista lacrymalis des Thränenbeins. Den An-

fangstheil dieser Faserbündel von der Ursprungsstelle bis zum inneren Augenwinkel, wo sie auf die Lidränder übertreten, hat man früher als einen besonderen Muskel unter dem Namen des Horner'schen (musculus sacci lacrymalis) beschrieben. Auf Grund eingehender Zergliederung der Verhältnisse hat Henke [1] die Behauptung aufgestellt, dass die in Rede stehenden Bündel keineswegs wie die bogenförmigen zur Schliessung des Lidspaltes, sondern dass sie vielmehr zu dessen Oeffnung mitwirken. Henke macht nämlich darauf aufmerksam, dass die gerade Verbindungslinie vom Ursprung dieser Bündel an der crista lacrymalis zu ihrem mechanischen Ansatz am Rande des Jochbeins hinter dem Krümmungsmittelpunkt der Hornhaut hergeht und dass mithin die Zusammenziehung der Bündel die Lidränder vom Scheitel der Hornhaut nach hinten abgleiten machen muss. Gestützt wird diese Annahme durch die feine Beobachtung Henke's, dass der innere Augenwinkel d. h. das Ende des inneren Augenlidbandes bei der Schliessung der Augenlider vortritt, bei ihrer Oeffnung zurückweicht, offenbar rückwärts gezogen durch die Zusammenziehung des Horner'schen Muskels, der also bei diesem Akte betheiligt sein muss. Da er aber nichts Anderes ist als der Ursprungstheil jener am Lidrande hinziehenden Bündel des orbicularis, so werden sie im Ganzen einen Oeffner des Lidspaltes darstellen.

In den Conjunktivalsack nahe der Umschlagfalte oben und aussen ergiessen sich die 3—5 Ausführungsgänge der Thränendrüsen, welche in einer nischenartigen Vertiefung vom Jochfortsatze des Stirnbeins liegen.

Die Thränenflüssigkeit, deren Absonderung und Zusammensetzung in der Lehre von den Sekretionen abgehandelt ist, dient zur Feuchthaltung der freiliegenden Theile des Augapfels, der Ueberschuss derselben wird durch einen besonderen Mechanismus nach der Nase abgeleitet. In der Nähe der inneren Augenwinkel nämlich ist an jedem Lidrande eine kleine Papille auf deren Höhe die freie Ausmündung eines feinen Kanälchens liegt, das in den sogenannten sacculus lacrymalis ausmündet. Dieser stellt das obere etwas erweiterte Ende des aus der Anatomie bekannten Thränennasenganges dar, der weiter unten zwischen Knochen hindurch in den unteren Nasengang einmündet.

Es ist eine bekannte Thatsache, dass bei reichlicher Thränenabsonderung das Ueberfliessen derselben über den Lidrand durch häufigen Lidschlag verhindert werden kann, wobei der untere Nasen-

1 Henke, Die Oeffnung und Schliessung der Augenlider und des Thränensackes. Arch. f. Ophthalmol. Bd. IV. 2. Abth.

gang offenbar durch die dahin geführte Thränenflüssigkeit merklich feucht wird, oft in dem Grade, dass ein Bedürfniss der Entleerung durch die Nasenlöcher entsteht. Diese Erscheinung deutet darauf hin, dass der Lidschlag eine pumpende Wirkung äussert, welche die Thränenflüssigkeit rasch vom Bindehautsack zur Nasenhöhle fördert. Eine höchst ansprechende Erklärung dieser Pumpwirkung hat Henke auf die schon oben von ihm entlehnten anatomischen Bemerkungen gegründet. Beim Schliessen der Augenlider nämlich wird wie wir sahen das innere Augenlidband aus seiner Nische etwas hervorgehoben und dadurch der Thränensack entfaltet, da seine vordere Wand mit jenem Bande verwebt ist. Dadurch wird eine saugende Wirkung ausgeübt, welcher die Thränenflüssigkeit durch die kleinen Thränenkanälchen folgen kann, indem die Thränenpunkte in den sogenannten Thränenbach eintauchen, der dem geschlossenen Augenlidrand entlang läuft, da die vorderen Ränder des Lidsaumes enger zusammenschliessen als die hinteren. Die im Thränennasenkanal befindliche Flüssigkeit kann der Saugwirkung weniger Folge geben theils — bei aufrecht stehendem Kopfe — wegen der Schwere theils aber vielleicht gehindert durch eine klappenartige Schleimhautfalte vor der Nasenmündung des Kanales. Bei jedem Lidschluss wird also der Thränensack Flüssigkeit vom Bindehautsacke her ansaugen wenn solche vorhanden ist. Bei der Oeffnung der Augenlider ziehen sich nun nach Henke's Annahme die von der crista lacrymalis entspringenden hinter dem Thränensacke herlaufenden und dann dicht am Lidspalt hinziehenden Bündel zusammen ihr Anfangstheil zieht das innere Augenlidband wieder zurück (siehe oben) und es wird also der Thränensack zusammengedrückt. Er kann sich aber nun nicht nach dem Bindehautsack hin entleeren, da die am Lidrand hinziehenden Bündel die zwischen ihnen befindlichen Thränenpunkte komprimiren, um so mehr als einige Fasern dieser Bündel die Thränenpunkte schlingenförmig umgreifen und somit eigentliche Sphinkteren derselben darstellen. Die bei Oeffnung der Augenlider aus dem Thränensacke ausgepresste Flüssigkeit kann also nur nach der Nasenhöhle entweichen, womit die pumpende Wirkung des abwechselnden Schliessens und Oeffnens der Lidspalte vollständig erklärt wäre.

DRITTES CAPITEL.

Numerische Bestimmung der für die Strahlenbrechung im Auge maassgebenden Grössen.

I. Die Brechungsindices der durchsichtigen Augenmedien.

Wenn jetzt der Gang von Lichtstrahlen durch das beschriebene System durchsichtiger Körper des Auges untersucht werden soll, so müssen erstens die Brechungsindices der einzelnen durchsichtigen Stoffe und zweitens die geometrische Natur und Lage ihrer Trennungsflächen bestimmt werden. Sollen die über den Gang der Strahlen aufzustellenden Gesetze auf ein bestimmtes lebendes Auge anwendbar sein, so müssten streng genommen die erwähnten Bestimmungen an diesem individuellen lebenden Auge selbst gemacht werden. Da indessen verschiedene normale Augen schwerlich sehr bedeutende Unterschiede der hier maassgebenden Grössen aufweisen werden, so wird es erlaubt sein, nachdem die Bestimmungen an einigen Augen ausgeführt sind, durchschnittliche Werthe derselben als normale in die Rechnung einzuführen und so den Gang der Lichtstrahlen durch das System zu behandeln.

Was zunächst die Brechungsindices betrifft, so lassen sich dieselben leider am lebenden Auge gar nicht bestimmen, und ist man daher auf Bestimmungen an Leichen angewiesen. Dies wäre indessen nur ein geringer Nachtheil, da Krause[1] gezeigt hat, dass die Brechungsindices der Medien von Leichenaugen in den ersten 24 Stunden nach dem Tode keine merkliche Aenderung erleiden. Man ist hiernach berechtigt anzunehmen, dass diese Grössen im lebenden Auge dieselben Werthe haben, wie einige Stunden nach dem Tode. Bei verschiedenen Leichenaugen hat nun aber der soeben citirte Forscher merklich von einander abweichende Werthe der Brechungsindices gefunden. Es bleibt daher nichts anderes übrig, als aus einer möglichst grossen Anzahl von Bestimmungen an Leichenaugen Mittelwerthe zu berechnen. Schon verschiedene ältere Forscher, namentlich Chossat und Brewster haben gelegentlich Bestimmungen der Brechungsindices einzelner Augenmedien ausgeführt. Ein besonders rei-

1 Die Brechungsindices etc. Hannover 1855.

ches Material hat aber in neuerer Zeit KRAUSE herbeigeschafft, indem er an 20 Leichenaugen Messungen angestellt hat. Sie beziehen sich sämmtlich auf Strahlen von derjenigen Wellenlänge, welcher die hellste Stelle des Sonnenspektrums entspricht. Diese liegt zwischen den FRAUENHOFER'schen Linien *D* und *E* und zwar von *D* aus gerechnet etwa am Ende des ersten Drittels oder Viertels der Entfernung zwischen *D* und *E*. KRAUSE setzt für diese Strahlenart den Brechungsindex des Wassers nach den älteren klassischen Messungen = 1,33424 wodurch die Stelle des Spektrums genau bestimmt ist.

Diesen Bedingungen entsprechend ergab sich der Brechungsindex der Hornhautsubstanz im Mittel = 1,3507 der grösste Werth war 1,3569 der kleinste 1,3431, was auf eine ziemliche Breite der individuellen Schwankungen schliessen lässt.

Der Brechungsindex der wässrigen Feuchtigkeit war im Mittel = 1,3420 der grösste Werth = 1,3557 der kleinste = 1,3349. Der Brechungsindex des Glaskörpers beträgt im Mittel 1,3485, der grösste gefundene Werth war = 1,3569 der kleinste = 1,3361. HELMHOLTZ fand den Brechungsindex der wässrigen Feuchtigkeit und des Glaskörpers kleiner als KRAUSE ihn im Mittel fand nämlich = 1,3365 und = 1,3382. Ebenso fanden auch neuerdings FLEISCHER[1] und HIRSCHBERG[2] für diese Grössen Werthe, welche sich besser den von HELMHOLTZ gefundenen als den KRAUSE'schen Mittelzahlen anschliessen. Auch AUBERT[3] und MATTHIESSEN kamen zu ähnlichen Ergebnissen.

Eine besondere Betrachtung erfordern die Brechungsindices der Linse. Diese ist nämlich keineswegs ein optisch homogener Körper. Im Gegentheil hat der Brechungsindex jeder Linsenschicht einen andern Werth und zwar nimmt dieser Werth von der Oberfläche nach dem Kern stetig und regelmässig zu. Natürlich kann man nicht daran denken, diese Brechungsindices alle zu bestimmen. KRAUSE, der wie gesagt die ersten zahlreichen Bestimmungen der Brechungsindices gemacht hat, beschränkte sich daher darauf, aus jeder untersuchten Linse 3 Proben zu nehmen, eine von einer möglichst oberflächlichen Schicht, die zweite aus einer mittleren Schicht und die dritte aus dem innersten Kern. Die Schlussergebnisse dieser Untersuchung der Linsensubstanz sind in der nachstehenden Tabelle übersichtlich zusammengestellt.

1 S. FLEISCHER, Neue Bestimmungen der Brechungsexponenten der durchsichtigen flüssigen Medien des Auges. Inauguralabhdlg. Jena 1872.

2 HIRSCHBERG, Ophthalmologische Studien. Arch. f. Augen- u. Ohrenheilkunde IV. Sep.-Abdr. Wiesbaden 1874.

3 AUBERT's Darstellung der physiologischen Optik in dem Handbuch der gesammten Augenheilkunde, herausgeg. v. GRAEFE & SAEMISCH. II. S. 409. Leipzig 1876.

	Brechungsindex		
	der äusseren Linsenschicht.	der mittleren Linsenschicht.	des Kernes der Linse.
Maximum	1,4743	1,4775	1,4807
Minimum	1,3431	1,3523	1,4252
Mittel	1,4053	1,4294	1,4541.

Endlich ist über die optischen Eigenschaften der Linse noch zu bemerken, dass dieser Körper in seiner natürlichen Form zwischen polarisirenden Vorrichtungen Spuren von Doppelbrechung zeigt, die wohl auf elastische Spannungen in seinem Innern zu beziehen sind. Da jedoch beim Sehakt keinerlei Wirkung dieser Doppelbrechung zum Vorschein kommt, so ist keine Veranlassung dieselbe weiter zu verfolgen.

Wenn man die Constanten des dioptrischen Systemes des Auges einer Diskussion des Ganges der Lichtstrahlen durch das Auge zu Grunde legen will, so kann man offenbar den unzählig vielen verschiedenen Brechungsindices der Linsen-Schichten nicht Rechnung tragen; man muss vielmehr für eine erste Annäherung die Linse als einen homogenen Körper betrachten und fragen, welchen Brechungsindex man ihrer Substanz beizulegen habe, damit möglichst nahezu derselbe optische Erfolg erzielt werde, damit namentlich die Brennweiten der homogen gedachten Linse gleich denen der wirklichen werden. Es wäre ein grosser Irrthum, wollte man der homogen gedachten Linse als Brechungsindex etwa den Mittelwerth der verschiedenen Brechungsindices der wirklichen Linsenschichten beilegen, man würde dadurch ein weit weniger „kollectives" System erhalten, als es die wirkliche Linse ist. Ja wenn man der ganzen Linse den Brechungsindex des Linsenkerns beilegte, erhielte man immer noch ein zu wenig kollectives System.

Man kann sich von dem vorstehend ausgesprochenen Satze durch folgende Betrachtung überzeugen. Es ist erstens ohne weiteres in der Anschauung ersichtlich, dass man an jeder Stelle eines dioptrischen Systems eine parallelwandige Schicht eines beliebigen Mediums von verschwindend kleiner Dicke eingeschaltet denken kann ohne den Gang der Strahlen merklich zu ändern. Wir wollen nun die Linse uns beiderseits von unbegrenzten Mengen wässriger Feuchtigkeit umgeben und zwischen je zwei Schichten derselben ebenfalls eine unendlich dünne Schicht wässriger Feuchtigkeit denken. Dann haben wir ein System, dessen erstes und letztes Medium wässrige Feuch-

tigkeit ist, und dazwischen liegen alle Linsenschichten, sowie die bloss gedachten unendlich dünnen Schichten wässriger Feuchtigkeit. Das ganze System wird offenbar kollektiv wirken. Man kann aber dies System auch in Partialsysteme zerlegen, indem man jede Linsenschicht mit den beiden angrenzenden Schichten wässriger Feuchtigkeit für sich betrachtet. Von diesen Partialsystemen ist nur das vom Linsenkern gebildete kollektiv, die andern sind sämmtlich dispansiv, denn jede der um den Kern gelagerten Linsenschichten ist auf ihrer konkaven Seite stärker gekrümmt als auf ihrer konvexen und bildet in wässriger Feuchtigkeit eingetaucht eine konvexkonkave Linse. Die dispansive Kraft einer solchen ist offenbar um so grösser, je mehr der Brechungsindex ihrer Substanz den des beiderseits angrenzenden Mediums übertrifft. Man wird also die dispansive Kraft aller dieser konvexkonkaven Linsen steigern, wenn man den Brechungsindex aller vermehrt bis zu dem Werthe, welcher dem Brechungsindex des Linsenkernes zukommt, d. h. wenn man die geschichtete Linse ersetzt denkt durch eine homogene vom Brechungsindex des Kernes. Es ist aber klar, dass eine Erhöhung der dispansiven Kraft der sämmtlichen dispansiven Partialsysteme die kollektive Gesammtwirkung vermindern müsste, welche das ganze aus den Konkavlinsen und dem (kollektiv wirkenden) Kern ausübt. Somit ist bewiesen, dass eine homogene Linse, deren Brechungsindex dem des Linsenkerns entspricht, noch immer nicht so kleine Brennweiten besitzen wird, als die wirkliche geschichtete Linse. Will man also eine homogene Linse für die geschichtete setzen, so muss ihr ein Brechungsindex beigelegt werden, noch grösser als der des Linsenkernes. In den neueren Darstellungen der physiologischen Optik hat man — nicht ohne eine gewisse Willkür — als Brechungsindex der homogen gedachten Linse die Zahl $^{16}/_{11}$ angenommen, die zuerst von Listing vorgeschlagen ist und die den vorhin angegebenen Krause'schen Mittelwerth 1,4541 des Brechungsindex des Linsenkernes um 0,0004 übertrifft. Jedesfalls giebt diese Zahl in die Rechnungen eingeführt sehr annähernd richtige Resultate. Helmholtz hat an den Linsen von Leichen die Halbmesser der beiden Flächen und die Dicke zwischen den Scheiteln gemessen, und dann mit der Zahl $^{16}/_{11}$ als Brechungsindex die Brennweite berechnet. Andererseits hat er diese Brennweite direkt bestimmt und auf beiden Wegen nur sehr wenig abweichende Werthe gefunden.

Auch vom Brechungsindex der Hornhaut und der Linsenkapsel sind neuerdings einzelne Bestimmungen ausgeführt. Sie haben Werthe ergeben, die nicht sehr weit von denen des Brechungsindex der wässrigen

Feuchtigkeit abliegen. Da indessen bei unseren späteren Betrachtungen auf die Brechung an diesen Membranen doch keine Rücksicht genommen wird, so brauchen wir uns mit ihren Brechungsindices nicht zu beschäftigen.

Es verdient endlich noch bemerkt zu werden, dass Matthiessen[1] auf Grund neuer Messungen behauptet, dass die Zunahme der Brechungsindices in den äussersten Linsenschichten rascher erfolge, als in den inneren. Matthiessen schreibt diesem Umstande eine Bedeutung zu für Erhöhung des totalen Brechungsindex und für den Aplanatismus der Linse.

II. Lage und Gestalt der Trennungsflächen.

Die geometrische Natur und Lage der Trennungsflächen zwischen den brechenden Medien kann am lebenden Auge annähernd bestimmt werden. Es dient hierzu die Spiegelung von aussen einfallenden Lichtes an diesen Flächen. Aeltere Methoden zu demselben Zwecke haben nur noch ein historisches Interesse und sind daher hier ganz zu übergehen.

Ganz unmittelbar ist die vordere Hornhautfläche der Beobachtung zugänglich und die Reflexion des Lichtes an ihr erzeugt ganz deutliche Bilder heller Gegenstände, welche von Alters her bekannt sind. Die Krümmung der Fläche mag nun im ganzen beschaffen sein wie sie wolle, immer wird man, wenn sie nur allseitig konvex ist, in erster Annäherung jedes kleine Stückchen derselben als Stückchen einer Kugelfläche betrachten können. Bei Spiegelung eines entfernten und nicht allzu ausgedehnten Gegenstandes kommt aber eben immer nur ein sehr kleiner Theil der Hornhautfläche als spiegelnde Fläche zur Wirkung. Man weiss nun aus der Katoptrik, dass bei einem konvexen Kugelspiegel die Grösse des Bildes sich zur Grösse des Objektes verhält wie der halbe Halbmesser der Kugelfläche zur Entfernung des Objektes vom Mittelpunkte der Kugel, unter der Voraussetzung dass der Objektabstand gegen den Halbmesser der Kugel sehr gross ist. Stellt man also in der genau gemessenen Entfernung p von der Hornhautfläche in einer Ebene, welche der Tangentialebene an den untersuchten Hornhautstücken parallel ist, ein geeignetes leuchtendes Objekt auf, von welchem eine Lineardimension l genau gemessen ist und gelingt es die entsprechende Lineardimension des Spiegelbildes l^* genau zu messen, so hat man zur Bestim-

1 Grundriss der Dioptrik geschichteter Linsensysteme.

mung des Halbmessers r des als Kugelstück betrachteten spiegelnden Oberflächenstückes der Hornhaut die Gleichung

$$\frac{l^*}{l} = \frac{\frac{1}{2} r}{r + p},$$

da indessen p jedesfalls ein sehr grosses Vielfaches von r sein muss, genügt es die Gleichung einfach so zu schreiben

$$\frac{l^*}{l} = \frac{\frac{1}{2} r}{p}.$$

Es kommt also nur noch darauf an eine Methode zu finden, nach der die Bildausdehnung l^* genau gemessen werden kann. Man hat zu diesem Zwecke früher einfach ein auf kurze Entfernung einstellbares Fernrohr mit Okularmikrometer angewandt. Das hat aber zwei Uebelstände. Erstens muss man hier auch noch den Abstand des Fernrohres vom beobachteten Auge genau kennen und zweitens erfordert die Messung zwei Akte der Aufmerksamkeit des Beobachters, nämlich auf die beiden Punkte des Okularmikrometers, mit denen die beiden Enden des beobachteten Spiegelbildes zusammenfallen. Zwischen diesen beiden Akten der Aufmerksamkeit verstreicht aber eine gewisse Zeit und wenn während derselben das beobachtete Auge eine Bewegung gemacht hat, so geht der ganze Betrag derselben als Fehler in die Messung ein. Um diese Fehlerquellen zu beseitigen hat Helmholtz einen Apparat konstruirt, durch welchen die Messung ausführbar ist in einem Akte der Aufmerksamkeit des Beobachters und ohne dass die Entfernung des Messinstrumentes vom beobachteten Auge bestimmt zu sein braucht. Dieses Instrument, das seither in der physiologischen und pathologischen Optik unter dem Namen des Ophthalmometers eine bedeutende Rolle spielt, ist auf folgendes Princip gegründet. Fällt von einem leuchtenden Punkte P ein Strahlenbündel schräg auf eine planparallele Glasplatte, deren Abmessungen gegen die Entfernung des leuchtenden Punktes klein sind, so wird hinter derselben ein Bündel entstehen, in welchem jeder Strahl dem entsprechenden einfallenden merklich parallel, aber um ein bestimmtes Stück verschoben ist und zwar nach dem Fusspunkte des Perpendikels vom leuchtenden Punkte auf der Glasplatte. Die in Linienmaass gemessene Verschiebung, welche jeder Strahl parallel mit sich erleidet, hängt lediglich ab vom Brechungsindex des Glases, der Dicke der Platte und dem Einfallswinkel der Strahlen. Je grösser dieser ist, desto grösser ist die lineare Verschiebung. Für irgend ein hinter der Glasplatte befindliches System, welches im Sinne des 1. Abschnittes optische Bilder liefert, wirkt also die Zwischenschiebung der Glasplatte genau so, als ob der leuchtende Punkt

um ein gewisses Stück zur Seite geschoben und ausserdem ein klein wenig angenähert wäre, auf welchen letzteren Umstand jedoch hier nichts ankommt. Man kann sich hiervon leicht überzeugen, wenn man durch eine mit der Hand vor das Auge gehaltene Glasplatte hindurchsieht. Sowie man sie schräg dreht, scheinen alle Objekte ein wenig nach der Seite zu weichen und zwar um so mehr, je schräger die Platte gegen die Sehrichtung gestellt wird. Es ist dabei auch leicht zu bemerken, dass der Werth der linearen Verschiebung unabhängig ist von der Entfernung der Objekte, so dass sie bei sehr entfernten Gegenständen gar nicht mehr wahrgenommen werden kann.

Statt eines Auges wollen wir uns nun zunächst hinter der Glasplatte das Objektiv eines auf kurze Distanzen einstellbaren Fernrohres denken. Ferner wollen wir die Glasplatte in zwei Stücke zerschnitten denken, von denen das eine vor der oberen, das andere vor der unteren Hälfte des Objektivs steht. Endlich sollen diese beiden Stücke der Glasplatte in einen Mechanismus eingefügt sein, vermöge dessen sie immer um gleiche Winkel in entgegengesetztem Sinne gedreht werden können, so dass die optische Axe des Fernrohres stets den Winkel halbirt, unter welchem sich die erweiterten Ebenen der Platten schneiden. Hiermit ist die wesentliche Einrichtung des Ophthalmometers gegeben. Sie ist in Fig. 8 mit Weglas-

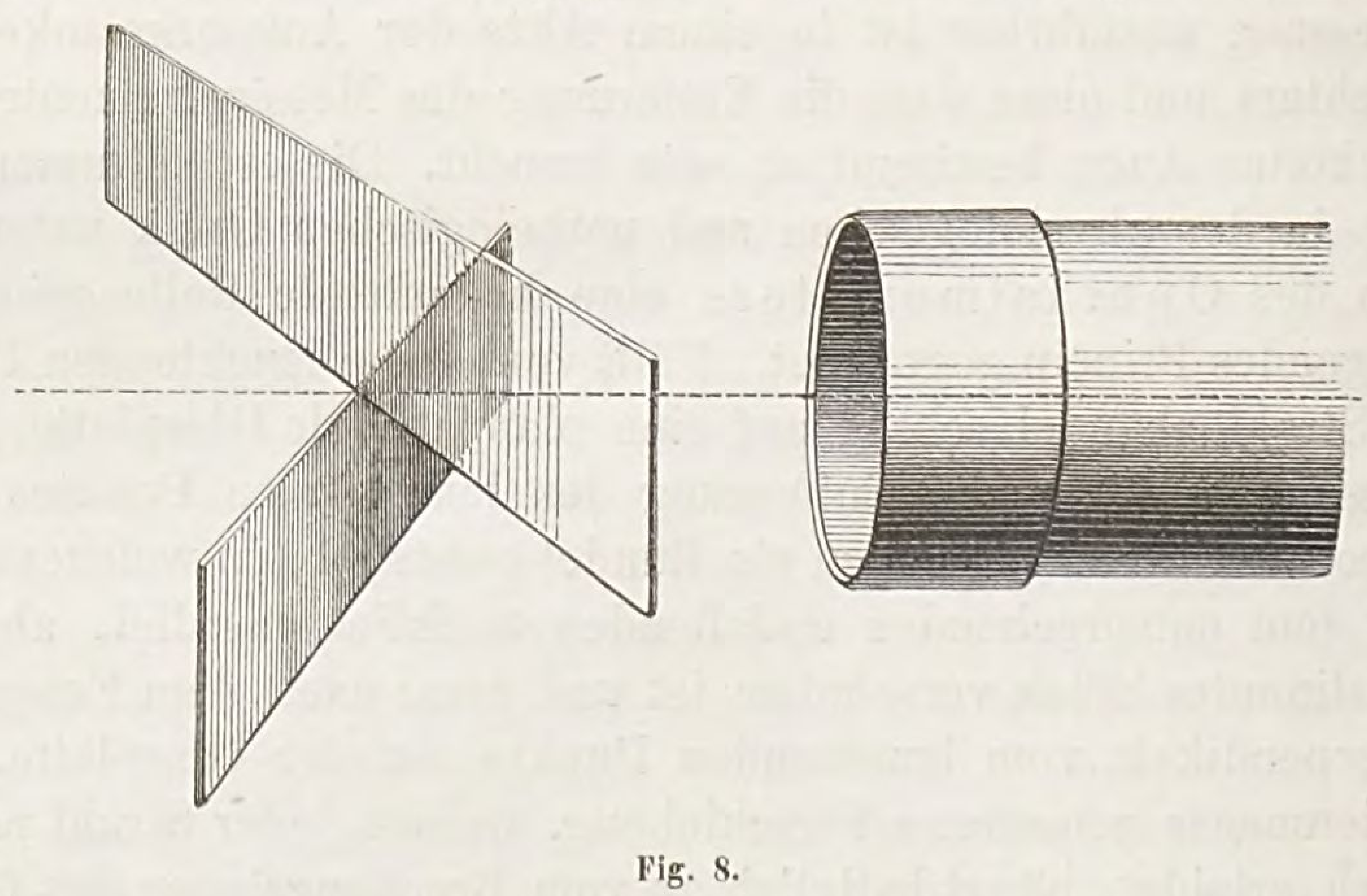


Fig. 8.

sung des Mechanismus, durch welchen die Glasplatten geführt werden, dargestellt. Der Erfolg ist nun leicht vorherzusehen, stellt man die beiden Platten senkrecht zur Axe des Fernrohres so, dass eine die Fortsetzung der andern bildet, dann wird von einem vor ihnen gelegenen Objekte durch das Fernrohr nur ein Bild gesehen werden. So-

wie man aber den Mechanismus anfängt zu drehen, zerfällt das Bild in zwei, welche um so weiter auseinanderrücken je kleiner der Winkel wird, unter welchem die Axe des Fernrohres die Platten schneidet. In der That jetzt zerfällt jedes von einem Punkte des Objektes ausgehende Strahlenbündel in zwei Hälften, die eine durch die obere schräge Platte gehende Hälfte verhält sich dahinter — also im Fernrohr — genau so, als ob sie von einem etwas zur einen Seite des wirklichen Objektpunktes gelegenen Punkte ausgegangen wäre, die andere Hälfte, durch die untere Platte gegangen, verhält sich im Fernrohr so, als wäre sie von einem um ebensoviel zur anderen Seite des wirklichen Objektpunktes gelegenen Punkte ausgegangen. In der Bildebene des Fernrohres müssen demnach von jedem Objektpunkte zwei Bildpunkte entstehen. Ist nun das ganze Objekt hinlänglich schmal, so wird man bei fortgesetzter Drehung der Platten zu einem Punkte kommen, wo der linke Rand des einen scheinbaren Objektes mit dem rechten des anderen zusammenfällt, wo also die Verschiebung der beiden scheinbaren Objekte gegeneinander ihrer Breite gleich geworden ist. Hat man also zum Voraus für jede Winkelstellung der Platten durch Rechnung oder empirisch die Verschiebung ermittelt, so hat man durch Bestimmung der zu dem gedachten Erfolge erforderlichen Winkelstellung eine Messung der Objektbreite ausgeführt, was wie man sieht in einem Akte der Aufmerksamkeit geschieht, ohne dass Bewegungen des Objektes dabei störend wären, da solche Bewegungen von beiden Bildern ganz gleichmässig mitgemacht werden.

Um nun die Krümmungshalbmesser einzelner Stücke der vorderen Hornhautfläche zu bestimmen, stellt man in grosser aber genau gemessener Entfernung von dem beobachteten Auge ein geeignetes Objekt auf, am besten besteht es aus drei Lichtflammen vor einem Maasstab, von denen zwei zu beiden Seiten eines Theilstriches dicht beisammen stehen, die andere vor einem weit davon entfernten Theilstriche. Der Maasstab steht auf einer vom beobachteten Auge nach seiner Mitte gezogenen Geraden senkrecht. Das Spiegelbild dieses Flammensystems in der Hornhaut des beobachteten Auges bildet nun für das Ophthalmometer das Objekt. Da es aus drei Lichtpünktchen besteht, von denen zwei ganz dicht zusammen liegen, ist es sehr geeignet, den Augenblick zu bestimmen, wo die Verschiebung der Doppelbilder gerade seiner Breite gleich ist, denn dieser Augenblick ist derjenige, wo das einzelne Lichtpünktchen vom einen Bilde gerade in die Mitte zwischen die beiden dicht beisammen liegenden Pünktchen vom andern Bilde getreten ist. Als Breite des Objektes

ist dann in Rechnung zu bringen die Strecke des erwähnten Maassstabes zwischen dem Theilstriche, vor welchem die einzelne Flamme steht und demjenigen, zu dessen beiden Seiten die beiden andern Flammen stehen. Natürlich kann man auch das Spiegelbild eines anderen hellen Objektes, z. B. einer entfernten Fensteröffnung, verwenden.

Durchmustert man auf diese Art verschiedene Stellen der Hornhaut desselben Auges, so findet man den Krümmungshalbmesser am Scheitel kleiner als gegen den Rand. Die Gestalt der vorderen Hornhautfläche weicht also sehr merklich von der Kugelgestalt ab und würde genauer zur Deckung gebracht werden können mit einem am Scheitel genommenen Abschnitte eines Ellipsoides, das durch Drehung einer Ellipse um ihre grosse Axe entstanden ist oder etwa einem an der Spitze einer Eioberfläche genommenen Abschnitte. Später werden wir noch eine andere Abweichung der Hornhautoberfläche von der Kugelgestalt zu berücksichtigen haben. Wenn man eine genügende Anzahl von Krümmungshalbmessern für genau bestimmte Stellen eines Meridianes der Hornhaut gefunden hat, so kann man natürlich die Elemente derjenigen Ellipse berechnen, welcher sich dieser Hornhautmeridian am genauesten anschliesst.

In nachstehender Tabelle sind die Ergebnisse dreier Systeme solcher Messungen wiedergegeben, welche Helmholtz an den Augen von 3 weiblichen Individuen zwischen 25 und 30 Jahren ausgeführt hat und zwar beziehen sie sich auf den horizontalen Meridian der drei Augen.

Bezeichnung des Auges	*A*	*B*	*C*
Krümmungshalbmesser am Scheitel	7,338	7,646	8,154
Quadrat der Excentricität	0,4367	0,243	0,3037
Halbe grosse Axe .	13,027	10,100	11,711
Halbe kleine Axe .	9,777	8,788	9,772
Horizontaler Durchmesser des Umfangs	11,64	11,64	12,092
Abstand des Scheitels von der Ebene des Umfangs .	2,56	2,531	2,511
Winkel zwischen der grossen Axe und der Gesichtslinie .	4°19′	6°43′	7°35′

Zu der letzten in der Tabelle aufgeführten Winkelgrösse sei noch bemerkt, dass unter „Gesichtslinie“ die Richtung des genausten Sehens zu verstehen ist. Die Begründung für das Vorhandensein einer solchen kann erst in der Lehre von den Lichtempfindungen vollständig gegeben werden, doch mag schon hier bemerkt sein, dass sie im Sinne nach vorn verfolgt von der nach vorn verlängerten Symmetrieaxe des Auges meist sehr merklich nasenwärts abweicht.

Die Grösse dieses Winkels ist später noch von andern Forschern [1] an verschiedenen Augen gemessen und stets fand sich, dass die grosse Axe des Hornhautellipsoides schläfenwärts von der Gesichtslinie abwich.

Die Abweichung der vorderen Hornhautfläche von der Kugelgestalt ist offenbar von Vortheil für die Schärfe der Bilder, wenn bei weiter Pupille Strahlenbündel zur Wirkung kommen, deren Randstrahlen schon auf eine Zone der Cornea fallen, welche an deren Mittelpunkt einen nicht ganz kleinen Winkel umspannt, so dass die einschränkenden Bedingungen des ersten Abschnittes nicht mehr hinreichend erfüllt wären. Solche Strahlen würden nämlich an einer wirklichen Kugelfläche früher zur Vereinigung gebracht, als in dem Bildpunkte dessen Lage im ersten Abschnitte für ein sehr schmales Strahlenbündel bestimmt wurde. Diese Abweichung von der Homocentricität der an grösseren Kugelabschnitten gebrochenen Strahlenbündel nennt man Abweichung von der Kugelgestalt. Ein brechendes System, in welchem diese Abweichung möglichst korrigirt ist, nennt man „aplanatisch". Es ist klar, dass die schwächere Krümmung der Hornhaut gegen den Rand hin im Sinne des Aplanatismus wirken muss. Ausführlich hat hierüber neuerdings MATTHIESSEN [2] gehandelt. Schon vor längerer Zeit hat VOLKMANN [3] über den Aplanatismus des Gesammtauges Untersuchungen angestellt.

Aeltere Messungen von KOHLRAUSCH mit Okularmikrometer haben für den Krümmungshalbmesser der vorderen Hornhautfläche den durchschnittlichen Werth von 7,87 mm. ergeben.

An der Hinterfläche der Hornhaut findet keine merkbare Spiegelung statt. Der Grund dürfte darin zu suchen sein, dass wegen der kleinen Differenz zwischen den Brechungsindices der hier aneinandergrenzenden Medien die Spiegelung überhaupt sehr schwach ist und dass die von ihr gelieferten Bilder nothwendig ganz dicht neben die von der Vorderfläche der Hornhaut entworfenen Spiegelbilder derselben Objekte fallen müssen und daher neben diesen sehr hellen Bildern verschwinden.

Bezüglich der hinteren Hornhautfläche ist man daher auf direkte Messungen an Leichenaugen angewiesen. Solche haben ergeben, dass die Krümmung derselben wahrscheinlich etwas stärker ist, als die der vorderen, denn man findet regelmässig die Hornhäute von Leichen am Rande ein wenig dicker als in der Mitte. Uebrigens ist eine genaue Bestimmung der Krümmung der hinteren Hornhautfläche nicht

1 MANDELSTAMM, Zur Ophthalmometrie. Arch. f. Ophthalmologie XI. 2. Abth. S. 259.

2 Arch. f. Ophthalmologie XXIII. 1. Abth. S. 125.

3 Wagner's Handwörterb. d. Physiol. Art. „Sehen".

erforderlich, da die Brechung an ihr auf den Gang der Strahlen durch das Auge sicher nur von ganz verschwindendem Einflusse ist.

Man kann sich hiervon auf folgendem Wege überzeugen. Es ist schon weiter oben erwähnt, dass man in jedes brechende System an jeder Stelle eine verschwindend dünne Schicht eines durchsichtigen Körpers von beliebigem Brechungsindex eingeschaltet denken kann, ohne dass dadurch der Gang der Strahlen merklich verändert würde. Wir wollen uns nun an der vorderen Hornhautfläche eine solche verschwindend dünne Schicht wässriger Feuchtigkeit ausgebreitet denken, was ohnehin den thatsächlichen Verhältnissen entsprechen dürfte, da die hier immer vorhandene benetzende Schicht der Thränenflüssigkeit wohl in ihrer Brechkraft von der wässerigen Feuchtigkeit nicht merklich verschieden sein wird.

Jetzt werden wir also ein System vor uns haben, bestehend aus Luft, wässriger Feuchtigkeit (in kapillärer Schicht), Hornhautsubstanz, wässriger Feuchtigkeit. Lassen wir nun homocentrische Strahlenbündel in die erste Schicht wässriger Feuchtigkeit eintreten, so wird sich darin ein System von wiederum homocentrischen Strahlenbündeln bewegen, deren Centra wir für die weitere Brechung als Objektpunkte anzusehen haben und zwar, beiläufig gesagt, wenn sie hinter der Hinterwand der kapillären Schicht liegen als virtuelle. Wir wollen nun ein solches in dieser Schicht sich fortpflanzendes Strahlenbündel ins Auge fassen, die Entfernung seines Centrums von der wirklichen vorderen Hornhautfläche mit q bezeichnen und auf seine Brechung an derselben die Formel S. 9 anwenden, wollen aber für die wie immer nach hinten positiv gerechnete Entfernung des Bildpunktes von der Trennungsfläche einstweilen die Bezeichnung q^* einführen, so dass man hat

$$\frac{1}{q} + \frac{n}{q^*} = \frac{n-1}{r}$$

wo r den Halbmesser der vorderen Hornhautfläche und n den Brechungsindex beim Uebergang von Strahlen aus wässriger Feuchtigkeit in Hornhautsubstanz bedeutet. Da nun der absolute Brechungsindex der ersteren 1,3420, der der letzteren = 1,3507 ist, so ist

$$n = \frac{1,3507}{1,3420} = 1,00634$$

zu setzen. Bei der ausserordentlich geringen Abweichung dieses Werthes von 1 ist der aus obiger Formel sich ergebende Werth von

$$q^* = \frac{nqr}{(n-1)\,q - r} = \frac{nq}{(n-1)\,\frac{q}{r} - 1}$$

von $-nq$ nicht merklich verschieden, so lange nicht $\frac{q}{r}$ eine sehr

grosse Zahl ist, d. h. so lange nicht die Entfernung des Strahlencentrums von der vorderen Hornhautfläche sehr gross ist gegen den Halbmesser derselben.

Das soeben gefundene Centrum des in der Hornhautsubstanz sich fortpflanzenden Strahlenbündels sehen wir nun als Objektpunkt an für die Brechung an der hinteren Hornhautfläche, deren Radius mit ϱ bezeichnet werden soll. Für die Brechung beim Uebergang aus Hornhautsubstanz in die dahinter gelegene wässrige Feuchtigkeit gilt nun natürlich als Brechungsindex der reciproke Werth von n, d. h. $\frac{1}{n}$ und es besteht also hier zwischen Objektabstand s und Bildabstand s^* die Gleichung

$$\frac{1}{s} + \frac{\frac{1}{n}}{s^*} = \frac{\frac{1}{n} - 1}{\varrho} \quad \text{oder} \quad \frac{1}{s} + \frac{1}{n s^*} = - \frac{n-1}{n \varrho}.$$

Es handelt sich aber um Bestimmung des Bildes von dem vorhin gefundenen Bilde, dessen Abstand von der vorderen Hornhautfläche q^* war. Der Abstand dieses Punktes von der hinteren Fläche der Hornhaut hat zum numerischen Werth $q^* - d$, wenn d die Dicke der Hornhaut bedeutet. Da aber diese Grösse in die neue Rechnung als Objektabstand eingeht, so muss $s = -(q^* - d) = d - q^*$ gesetzt werden, und wenn man für q^* den gefundenen Näherungswerth $-nq$ einsetzt, so hat man die Gleichung

$$\frac{1}{d + nq} + \frac{1}{n s^*} = - \frac{n-1}{n \varrho}.$$

Hieraus ergiebt sich

$$s^* = - \frac{\frac{d}{n} + q}{(n-1)\frac{d + nq}{n\varrho} + 1}$$

also aus dem oben angeführten Grunde annäherungsweise

$$s^* = -\left(\frac{d}{n} + q\right).$$

Wenn wir aber die Entfernung des letzten Bildpunktes von der vorderen Hornhautfläche nach hinten durch p^* bezeichnen, so müssen wir zu dem soeben gefundenen Werthe von s^*, der von der zweiten Hornhaufläche nach hinten positiv gemessen wird, d addiren und haben also

$$p^* = d - \left(\frac{d}{n} + q\right) \quad \text{oder} \quad p^* = -q + \frac{n-1}{n} d.$$

Da aber die positive Richtung für die Messung der Objektabstände

q nach vorn, der Bildabstände p^* nach hinten geht und die Rechnung sehen lässt, dass p^* und q entgegengesetztes Zeichen haben, ihr absoluter Werth aber sich nur um die sehr kleine Grösse

$$\frac{n-1}{n} d$$

unterscheidet, so zeigt sich, dass der Bildpunkt, den die beiden Brechungen an den Grenzen der Hornhautsubstanz hervorbringen, mit dem Objektpunkt fast genau zusammenfällt. Objektpunkt aber war das Centrum des in der kapillären Schicht vor der Hornhaut sich fortpflanzenden Strahlenbündels. Man sieht also, dass die aus der Luft kommenden Strahlenbündel in der wässrigen Feuchtigkeit fast genau ebenso verlaufen, als wenn man sich dieselbe bis an die vordere Hornhautfläche erstreckt denkt. Diese letztere Annahme kann man also getrost machen, was die weiteren Betrachtungen wesentlich vereinfacht. Doch mag noch hervorgehoben werden, dass diese Vereinfachung nur zulässig ist für Strahlenbündel, deren Centrum nicht sehr weit von der vorderen Hornhautfläche liegt, denn die Annäherung beruht ja darauf, dass die Grössen

$$(n-1)\frac{q}{r} \text{ und } (n-1)\frac{d+nq}{n\varrho}$$

gegen 1 vernachlässigt werden, was nur angeht, wenn

$$\frac{q}{r} \text{ und } \frac{q}{\varrho}$$

nicht sehr gross sind. Sie gilt also eigentlich nicht mehr, wenn q sehr gross ist, was bei Strahlenbündeln der Fall sein wird, die von Punkten in der Luft sehr nahe am Auge ausgegangen sind, und die also in der kapillären Schicht an der vorderen Hornhautfläche nahezu parallelstrahlig sein werden. Solche Strahlenbündel kommen indessen beim Sehakt im engeren Sinne des Wortes nicht in Betracht.

Jetzt muss zunächst die Entfernung des Scheitels der vorderen Linsenfläche vom Hornhautscheitel bestimmt werden. Um dies am Lebenden ausführen zu können, hat Helmholtz ziemlich verwickelte Methoden angewandt, denen der folgende Gedankengang zu Grunde liegt. Erstens lässt sich ganz exakt nachweisen, dass, wie schon oben bemerkt wurde, der Pupillenrand der vorderen Linsenfläche unmittelbar anliegt. Wenn man nämlich einen sehr starken Lichtkegel, etwa von einer hellen Lampenflamme, durch eine Konvexlinse in das Auge fallen lässt, so erscheint die Linse graulich getrübt, indem in der starken Beleuchtung die Grenzen zwischen den Formelementen derselben hinlänglich viel Licht zerstreuen, um sichtbar zu werden. Wäre nun die Pupillarebene von der vorderen Linsen-

fläche durch einen Zwischenraum getrennt, so müsste von der Iris ein Schlagschatten auf die Linse fallen, der bei schrägem Einblick als eine dunkle Zone zwischen dem Pupillarrande und dem beleuchteten Theile der Linse sichtbar werden müsste, da dies nie der Fall ist, so besteht ein solcher Zwischenraum nicht. Der Linsenscheitel liegt also in der Pupillarebene sofern man von der Vorwölbung der konvexen Linsenfläche in die Pupille hinein absieht. Es wäre also zu dem vorgesetzten Zwecke genügend, die Entfernung der Pupillarebene vom Hornhautscheitel zu bestimmen, was folgendermaassen geschehen kann. Ist für das zu untersuchende Auge die Krümmung der Hornhaut und die Lage ihrer grossen Axe zur Gesichtslinie nach den früher beschriebenen Methoden bekannt, so kann man einerseits genau den Ort angeben, wo das Spiegelbild eines bestimmten leuchtenden Punktes liegt. Ferner kann man dann auch noch, wenn für den Brechungsindex der wässrigen Feuchtigkeit ein bestimmter Werth angenommen wird, die Beziehung herstellen zwischen der wirklichen Entfernung der Pupillarebene von der vorderen Hornhautfläche und der Entfernung des (virtuellen) Bildes derselben, das entsteht durch die Brechung der von den Punkten des Pupillarrandes ausgegangenen Strahlenbündel an der vorderen Hornhautfläche bei ihrem Austritt in die Luft. Wir können dieses Bild die scheinbare Pupille nennen, sofern es das ist, was man als Pupille eines fremden Auges wirklich sieht.

Blickt man nun in ein Auge durch den Ophthalmometer und sucht eine Stellung so, dass die Doppelbilder des Hornhautreflexes von einem bekannten leuchtenden Punkt mit je einem Doppelbilde der Enden des wagrechten Durchmessers der scheinbaren Pupille zusammenfallen, so muss offenbar die auf das Hornhautspiegelbild gerichtete Axe des Ophthalmometers durch den Mittelpunkt der scheinbaren Pupille gehen. Sucht man nun zwei verschiedene solche Stellungen des Ophthalmometers in derselben horizontalen Meridianebene des Auges, so hat man zwei Richtungen, die sich nothwendig im Mittelpunkte der scheinbaren Pupille schneiden. Da auf jeder dieser Richtungen ein im Auge gelegener Punkt, nämlich der Ort des betreffenden Hornhautspiegelbildchens bekannt ist, so kann auch der Durchschnitt bestimmt werden. Ist dieser, d. h. also der Mittelpunkt der scheinbaren Pupille gefunden, so kann dann auch der Mittelpunkt der wirklichen Pupille bestimmt werden.

Die Ergebnisse der Messungen von Helmholtz an denselben 3 Augen, auf welche sich die obigen Messungen S. 48 beziehen, sind in nachstehender kleinen Tabelle verzeichnet.

		A	B	C
Abstand der Pupillarebene vom Scheitel der Hornhaut	scheinbar	3,485	3,042	3,151
	wirklich	4,024	3,597	3,739

Es verdient noch erörtert zu werden, warum die scheinbare Pupille vor der wirklichen liegt. Bei der kollektiven Natur des Systemes Luft-wässrige Feuchtigkeit getrennt durch die nach der Luftseite konvexe Hornhautfläche (siehe S. 12), hat man nämlich im allgemeinen allerdings zu erwarten, dass ein von einem Punkte in der wässrigen Feuchtigkeit ausgehendes Strahlenbündel beim Austritt in die Luft verwandelt wird in ein solches, dessen Strahlen konvergiren resp. weniger divergiren als vor der Brechung, dass demnach das virtuelle Bild eines solchen Punktes, wofern ein solches zu Stande kommt, hinter dem Objektpunkte liegt. Dies gilt aber, wie schon die Anschauung der Einfallslothe lehrt, nicht für Objektpunkte zwischen dem Mittelpunkte und der brechenden Fläche selbst oder für Werthe von $p < r$. Dasselbe ergiebt auch die Diskussion der Formel S. 9) Da nun die Punkte der Pupille diese Lage haben, so ist die anscheinende Paradoxie gehoben.

Die Bestimmung der ferneren Constanten des brechenden Systemes am lebenden Auge fusst wesentlich auf der Beobachtung der an der vorderen und hinteren Linsenfläche erzeugten Spiegelbilder der sogenannten SANSON-PURKINJE'schen Bilder. Es ist daher zunächst zu beschreiben, wie dieselben überhaupt zur Anschauung gebracht werden können. In gleicher Höhe mit dem zu beobachtenden Auge bringe man wenige Decimeter von demselben entfernt eine helle Kerzenflamme und in grosser Entfernung von ihm ein zu fixirendes Zeichen an. Der Winkel zwischen der Gesichtslinie des beobachteten Auges und seiner Verbindungslinie mit der Kerzenflamme mag etwa 45^0 betragen. Die Kerzenflamme muss einen dunklen Hintergrund haben damit keine störenden Hornhautreflexe entstehen. Der Beobachter bringt nun sein Auge in der für ihn passenden Sehweite in gleiche Höhe mit dem beobachteten Auge und blickt in einer Richtung hinein, welche mit dessen Gesichtslinie auf der anderen Seite ungefähr denselben Winkel bildet, wie die Richtung von der Flamme zum beobachteten Auge. Die Anordnung von Flamme *C* Gesichtszeichen *f* beobachtendem Auge *B* und beobachtetem Auge *A* ist in Figur 9 im Grundriss dargestellt. Der Beobachter gewahrt dann nach einigem Suchen durch Hin- und Hergehen um die Lage *B* herum die 3 Reflexbilder etwa in der Fig. 10 dargestellten Reihen-

folge wenn er die Lichtflamme zu seiner Linken[1] hat. Die schwarze Scheibe soll die Pupille des beobachteten Auges bedeuten. Das von

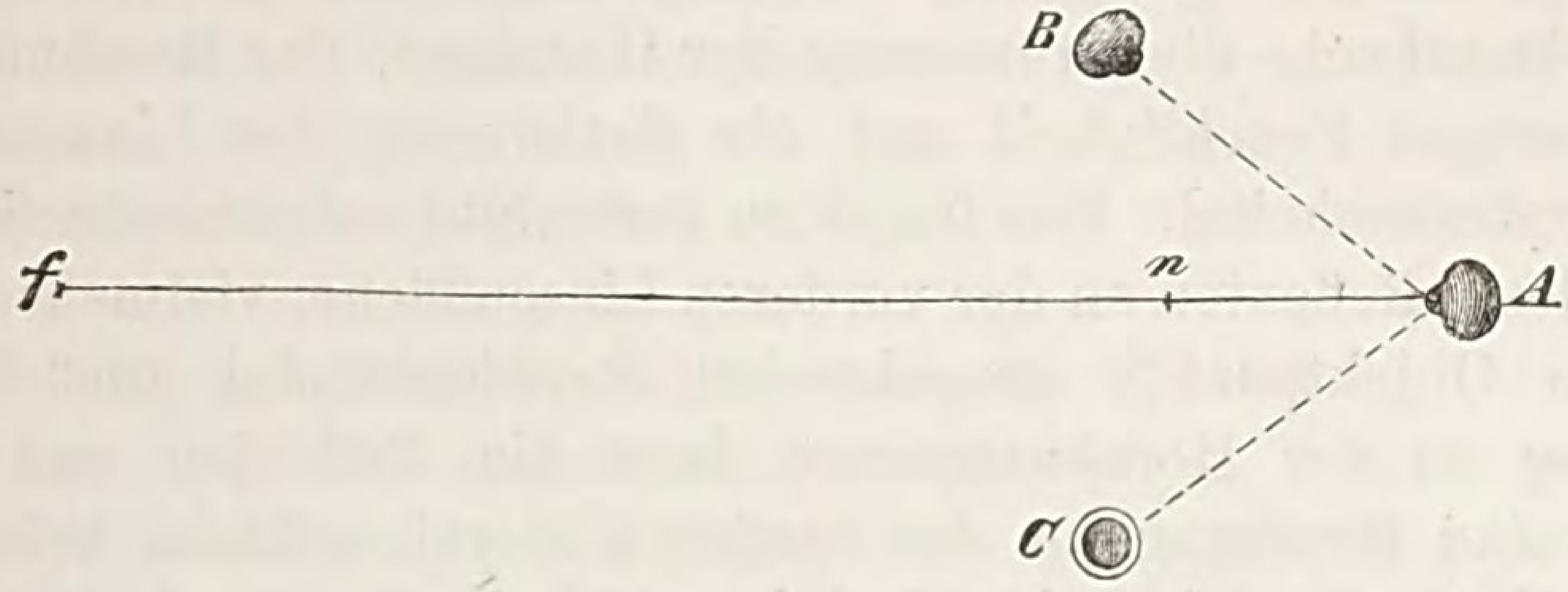


Fig. 9.

der Hornhautfläche gelieferte Spiegelbild *a* braucht übrigens nicht nothwendig im Bereich der Pupille zu erscheinen, wird es aber in der Regel bei den vorhin beschriebenen Anordnungen. *b* ist das von der vorderen Linsenfläche gelieferte Spiegelbild. Es ist wie der Hornhautreflex ein aufrechtes Bild der Lampenflamme aber gegen jenen ein äusserst matter Schimmer mit nicht ganz scharfer Grenze. Die Form der Flamme ist gleichwohl ungefähr zu erkennen und man bemerkt leicht, dass es bei weitem grösser ist als der Hornhautreflex. Wenn man das eigene Auge ein wenig hin- und herbewegt, so ändert das Bildchen *b* seine perspektivische Stellung in der Pupille bedeutend im gleichen Sinne mit der Bewegung des beobachtenden Auges und verschwindet meist schon bei mässigen Bewegungen hinter dem Pupillenrand. Daraus geht hervor, dass der Ort dieses (virtuellen) Bildchens weit (etwa 8 — 12 mm.) hinter der Pupille ist. Das dritte Bildchen *c* verdankt seine Entstehung der Spiegelung an der hinteren Linsenfläche; es ist ebenfalls bedeutend lichtschwächer als der Hornhautreflex und noch kleiner; als Spiegelbild von einem Hohlspiegel mit kleinem Radius ist es umgekehrt. Aus den kleineren perspektivischen Verschiebungen bei Bewegungen des beobachtenden Auges kann man schliessen, dass sein Ort nur etwa 1 mm. hinter der Pupillenebene liegt.

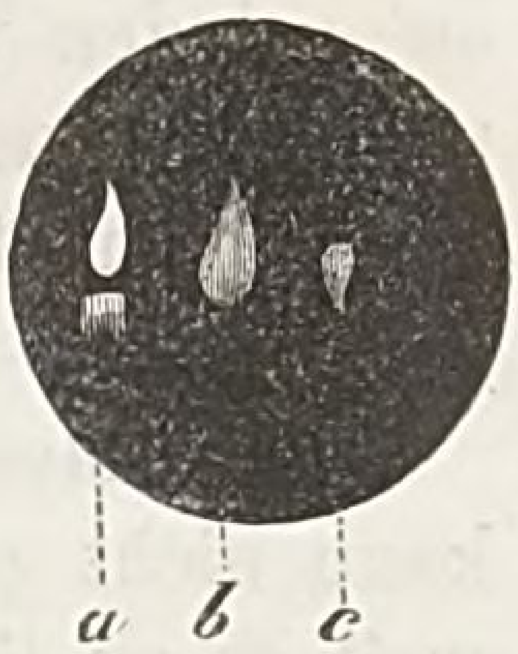


Fig. 10.

Wenn man nun von einem Gegenstand bekannter Grösse und bekannter Entfernung vom beobachteten Auge, das durch Reflex an

[1] Durch ein Versehen ist in Fig. 9 der Grundriss der Versuchsanordnung so dargestellt, dass der Beobachter die Lichtflamme zur Rechten hat. In diesem Falle würde die Anordnung der 3 Bildchen *a*, *b*, *c* die umgekehrte sein wie in Fig. 10.

der vorderen Linsenfläche entstehende Bild messen kann, so lässt sich daraus der Krümmungshalbmesser dieser als Kugelabschnitt betrachteten Fläche berechnen. Jedoch muss von demselben Auge noch bekannt sein die Krümmung der Hornhaut, der Brechungsindex der wässrigen Feuchtigkeit und die Entfernung des Linsenscheitels vom Hornhautscheitel. Das fragliche Reflexbild entsteht nämlich nicht durch blosse Reflexion an der vorderen Linsenfläche, vielmehr erleiden die vom Objektpunkte ausgehenden Strahlenbündel zunächst eine Brechung an der Hornhautgrenze dann die Reflexion und endlich wieder eine Brechung an der vorderen Hornhautfläche beim Rücktritt in die Luft. Dies dioptrisch-katoptrische System Luft, wässrige Feuchtigkeit, Linsenfläche, wässrige Feuchtigkeit, Luft lässt sich natürlich nach den Principien des ersten Abschnittes behandeln und wenn seine Constanten bis auf eine — hier den Halbmesser der spiegelnden vordern Linsenfläche — durch vorläufige andere Messungen bekannt sind, so kann eine fehlende berechnet werden, wenn man für ein bestimmtes Objekt die Grösse des Bildes gemessen hat.

Die Messung des Reflexbildes von der vorderen Linsenfläche kann nicht gut direkt mit dem Ophthalmometer ausgeführt werden weil es zu lichtschwach ist. Helmholtz hat es daher indirekt gemessen durch Vergleichung mit einem Hornhautspiegelbild von einem andern Objekte, dessen Grösse beliebig verändert werden kann bis sein Hornhautbild dem zu messenden Linsenbild der stärkeren Lichtquelle gleich geworden ist.

Auf diese Weise hat Helmholtz immer an denselben drei Augen den Krümmungshalbmesser der vorderen Linsenfläche bestimmt und zwar gefunden

für das Auge	A	B	C
	11,9	8,8	10,4.

Es gilt jetzt endlich noch die Lage und Krümmung der hinteren Linsenfläche zu ermitteln. Die Entfernung eines dem Scheitel jedesfalls sehr benachbarten Punktes der hinteren Linsenfläche vom Hornhautscheitel hat Helmholtz am lebenden Auge sehr annähernd bestimmt nach einer Methode, die sich auf folgende Betrachtung gründet. Ein in D (Fig. 11) befindliches beobachtendes Auge sehe in der Richtung Dd das von der hinteren Linsenfläche des beobachteten Auges gelieferte Spiegelbild einer bei C befindlichen Lichtflamme. Bei der Kleinheit dieses Spiegelbildchens wird man den Theil der spiegelnden Fläche, welcher die wirksamen Strahlen liefert als einen Punkt ansehen können, er ist mit i bezeichnet und es ist alsdann die ge-

brochene Linie $Cc\,i\,d\,D$ der Gang eines Lichtstrahles der von C in der Luft ausgeht, erst an der vorderen Hornhautfläche bei c, dann in einem nicht bezeichneten Punkte) an der vorderen Linsenfläche gebrochen hierauf reflektirt wiederum zweimal gebrochen bei d in Luft zurücktritt und sich nach D fortpflanzt. Genau denselben Weg würde ein von D ausgehender Lichtstrahl in umgekehrter Richtung verfolgen also am selben Punkte c, wo der erstgedachte eintrat, die Hornhaut verlassen um sich nach C fortzupflanzen. Man kann somit den Durchschnittspunkt h der beiden Richtungen cC und dD ansehen als das (virtuelle) Bild des in der Linsensubstanz gelegenen Objektpunktes i geliefert durch das brechende System Linsensubstanz — wässrige Feuchtigkeit — Luft. Könnte also die Lage von h zur Hornhaut genau bestimmt werden, so würde sich die Lage von i berechnen lassen, da die Constanten des genannten Systems nämlich der Halbmesser der Hornhaut der Ort der vorderen Linsenfläche sowie deren Halbmesser und endlich auch die Brechungsindices der wässrigen Feuchtigkeit und der Linsensubstanz für das Auge schon bekannt sind.

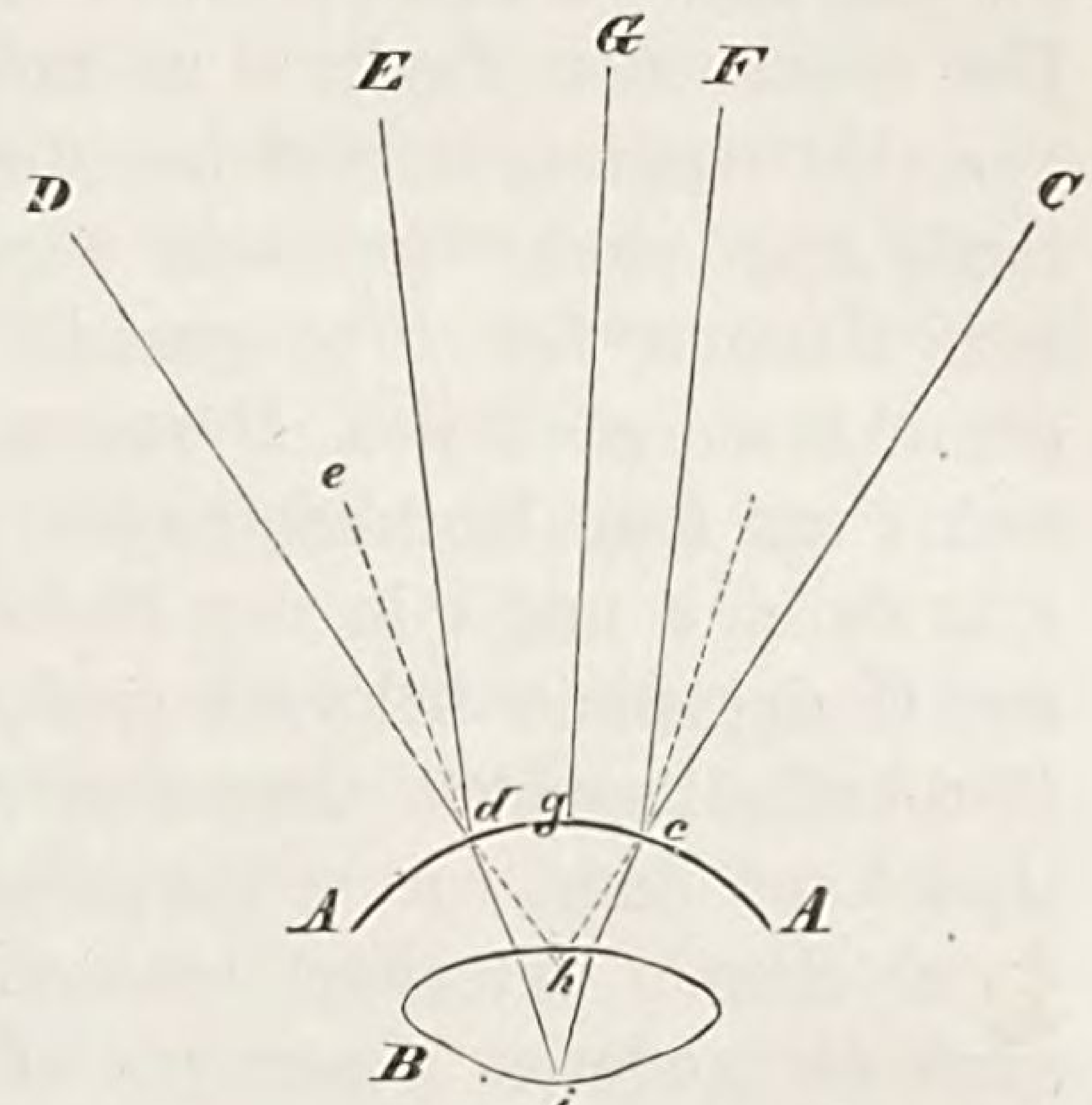


Fig. 11.

Die Lage des Punktes h oder des scheinbaren hinteren Linsenscheitels zur Hornhaut kann aber nur dann genau bestimmt werden, wenn die Punkte c und d an der Hornhaut genau bekannt sind, an welchen die beiden Strahlen in den bekannten Richtungen cC und dD aus der Hornhaut austreten. Bei der ersten oben gedachten Beobachtung kann nun schon der Punkt d bestimmt werden indem man gleichzeitig mit dem Reflex der Flamme C von der hinteren Linsenfläche einen Hornhautreflex einer anderen kleineren Flamme E beobachtet und diese so lange verrückt, bis ihr Hornhautreflex mit jenem Linsenreflex zusammenfällt dann ist offenbar der gesuchte Punkt d die spiegelnde Stelle der Hornhaut, diese aber kann gefunden werden, wenn man noch zuvor den Punkt g bestimmt hat wo die ebenfalls der Lage nach bekannt vorausgesetzte Gesichtslinie gG des beobachteten Auges die Hornhaut schneidet. Die Data der Beobachtung bestimmen nämlich den Winkel zwischen Ed und Gg, sowie den Winkel EdD dessen Hälfte zu jenem zwischen Ed und Gg

addirt den Centriwinkel der beiden durch *d* und *g* gehenden Hornhautradien ausmachen. Man kann sonach auch die Länge des Bogens *gd* und folglich den Ort des Punktes *d* auf der Hornhaut bestimmen. Um ebenso den Punkt *c* zu finden, muss eine zweite Beobachtung gemacht werden, in welcher die Flamme nach *D* und das beobachtende Auge nach *C* gebracht wird und wo abermals eine zweite kleinere Flamme bei *F* so gestellt wird, dass ihr Hornhautreflex mit dem Linsenreflex von *D* zusammenfällt. Sind aber die Punkte *d* und *c* auf dem Hornhautbogen *AA* bekannt, so findet sich, indem man durch *d* und *c* in den Richtungen *Dd* und *Cc*, deren Winkel mit der Gesichtslinie bekannt sind, Gerade zieht der Punkt *h* als ihr Durchschnittspunkt. Aus dem Abstand des Bildes *h* von der Hornhaut kann dann wie schon gesagt die Entfernung des Objektpunktes *i* von ebenda berechnet werden. An den drei Augen, an welchen auch die anderen Messungen ausgeführt sind, fand auf diese Weise Helmholtz:

	A	*B*	*C*
Scheinbare Entfernung des hinteren Linsenscheitels von der Hornhaut (*h*)	6,775	7,003	6,658
Wirkliche Entfernung (*i*)	7,172	7,232	7,141

Zieht man hiervon die früher gefundenen Werthe für die Entfernung der Pupillarebene von der Hornhaut ab, so erhält man für die Dicke der Linse in der Axe gemessen die Werthe

3,148 mm. 3,635 mm. 3,402 mm.

Eine kleine Correktion bedürfen diese Werthe noch wegen der Vorwölbung der vorderen Linsenfläche in die Pupille. Mit Berücksichtigung der gemessenen vorderen Linsenkrümmung und der Pupillenweite hat Helmholtz als korrigirte Werthe für die Linsendicke der drei Augen gefunden

3,414 mm. 3,801 mm. 3,555 mm.

Der grösste dieser Werthe erreicht aber noch nicht den kleinsten Werth der Linsendicke nämlich 4 mm. wie ihn frühere Forscher durch Messung an Leichenaugen bestimmt haben. Helmholtz glaubt dies nicht auf individuelle Zufälligkeiten beziehen zu dürfen, sondern auf einen gespannten Zustand, in welchem sich die Linse während des Lebens befinde, wovon weiter unten noch zu handeln sein wird.

Was endlich den Halbmesser der hinteren Linsenfläche betrifft,

so könnte man denselben aus der Grösse des Reflexbildes in ganz ähnlicher Weise für ein lebendes Auge berechnen. Hier würden aber in die Rechnung noch zwei Elemente mehr eingehen nämlich die soeben bestimmte Linsendicke und der Brechungsindex der Linsensubstanz, von denen namentlich dem letzteren wie wir sahen doch nur mit einer gewissen Willkür ein bestimmter numerischer Werth beigelegt werden kann. Man könnte sich daher wohl damit begnügen, dem Krümmungshalbmesser einen Werth beizulegen, wie er sich aus Messungen an Leichenlinsen ergiebt nämlich in runder Zahl 6 mm.

Die im Vorstehenden beschriebenen ophthalmometrischen Methoden sind von HELMHOLTZ später vervollkommnet worden, so dass seine Schüler[1] direkt die Grösse der Reflexbilder an den Linsenflächen ophthalmometrisch messen konnten. Es kommt für diesen Zweck wesentlich darauf an, ein sehr helles Objekt zu benutzen. Als solches diente die Zusammenstellung der Sonne mit einem Spiegelbild derselben. Nach dieser verbesserten Methode fand sich für ein gewisses Auge der Halbmesser der vorderen Linsenfläche = 9,8243 mm. und der der hinteren = 6,1249 mm.

Es ist jetzt noch die Frage aufzuwerfen, in wie weit die Mittelpunkte der drei als Kugelabschnitte betrachteten brechenden Flächen in eine grade Linie fallen und wie zu dieser Linie — der Augenaxe — die als Gesichtslinie definirte Gerade liege, deren Richtung durch den Fixationspunkt immer leicht zu bestimmen ist.

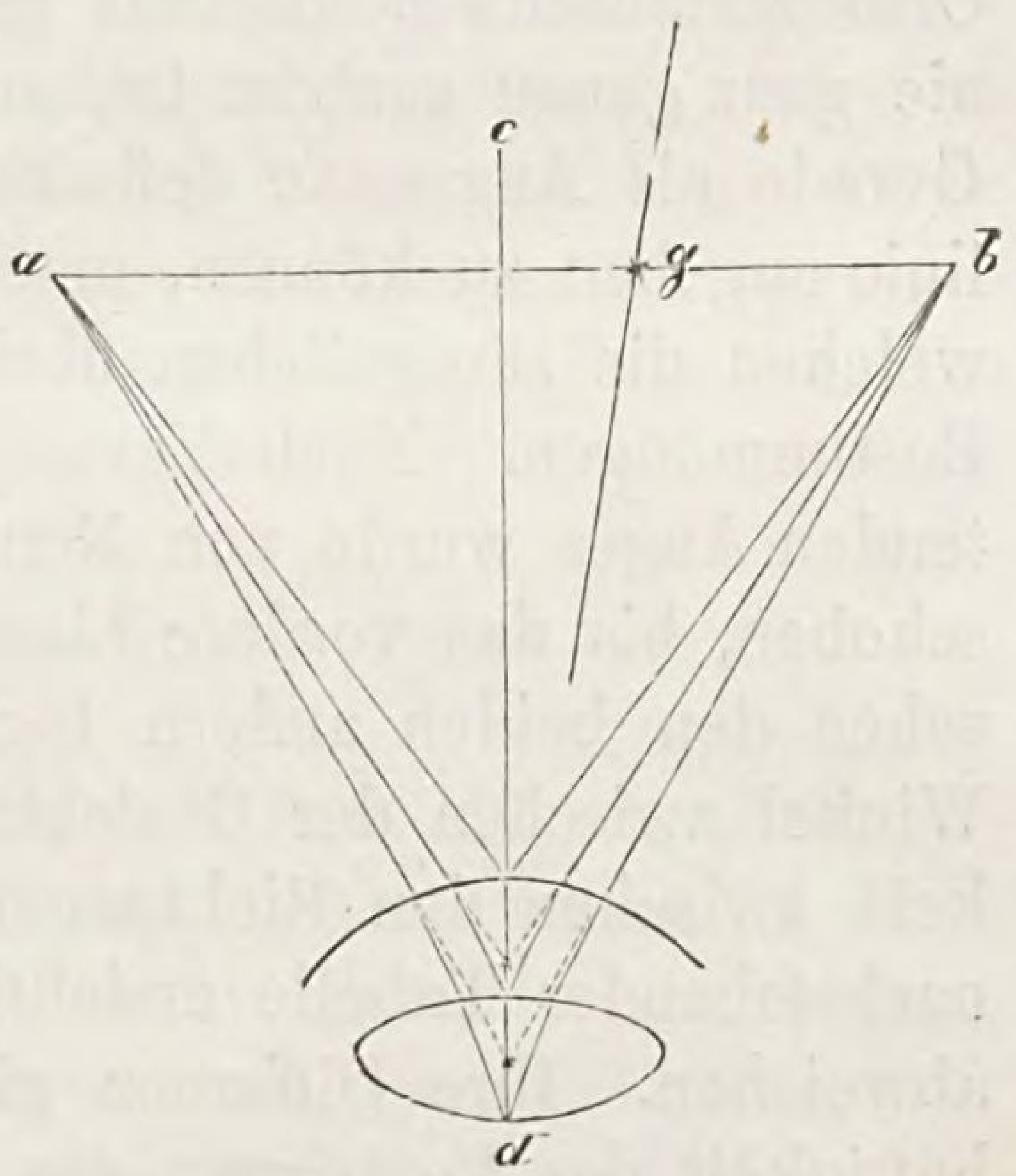


Fig. 12.

HELMHOLTZ hat zu diesem Zwecke folgendes Verfahren angewendet. Man denke sich bei *d* Fig. 12 das beobachtete Auge, dessen Linse und Hornhaut im Meridianschnitt angedeutet sind. Bei *a* sei das Auge des Beobachters und bei *b* eine Lichtflamme. Wäre nun das beobachtete Auge genau centrirt, d. h. lägen die Mittelpunkte der drei spiegelnden Flächen genau auf einer Geraden, so müsste eine Stellung desselben ermittelt werden können, bei welcher seine Axe, nämlich die Gerade, welche die drei Mittelpunkte enthält,

1 Rosow, Zur Ophthalmologie. Arch. f. Ophthalmometrie XI. 2. Abth. S. 129.

den Winkel genau halbirt, den die Richtungen von *b* und von *a* nach einem Punkte dieser Axe mit einander machen. Behielte das beobachtete Auge diese Stellung bei, so müssten, wenn Beobachter und Licht ihre Orte vertauschen, die drei Reflexbilder wieder ganz genau nur umgekehrt in derselben Lage erscheinen wie vorher. Ueberdiess müsste in beiden Fällen das Spiegelbild von der vorderen Linsenfläche ziemlich genau in der Mitte liegen zwischen dem Hornhautreflex und dem hinteren Linsenreflex da der scheinbare vordere Linsenscheitel ziemlich genau mitten zwischen dem Hornhautscheitel und dem scheinbaren hinteren Linsenscheitel liegt.

Helmholtz prüfte nun viele verschiedene Augen auf folgende Art. Dem beobachteten Auge wurde aufgegeben ein verschiebbares Gesichtszeichen *g* zu fixiren. Dies wurde dann so lange hinuntergerückt bis von *a* aus gesehen das vordere Linsenbild mitten zwischen dem Hornhautbild und dem hinteren Linsenbild von *b* erschien. Es ergab sich vor allem, dass dies niemals eintrat, wenn *g* in der Linie *cd* stand, welche den Winkel zwischen *ad* und *bd* halbirte, immer musste *g* etwas nasenwärts von *c* und oberhalb der Ebene *abd* befinden. Ferner zeigte sich, dass stets die drei Bilder sehr merklich andere gegenseitige Lagen hatten, wenn bei festbleibendem beobachteten Auge die Flamme und das Auge des Beobachters ihre Orte vertauschten. Hieraus geht hervor, dass das menschliche Auge nie ganz genau centrirt ist, um aber doch wenigstens annähernd eine Gerade als Augenaxe definiren und ihren Winkel mit der Gesichtslinie angeben zu können, machte Helmholtz für die drei Augen, an welchen die sämmtlichen übrigen Grössen gemessen waren, folgende Bestimmungen. Nach Vertauschung der Flamme und des beobachtenden Auges wurde von Neuem das Gesichtszeichen *g* so lang verschoben, bis das vordere Linsenspiegelbild wieder in der Mitte zwischen den beiden andern lag. So erhielt er für jedes Auge zwei Winkel zwischen der Gesichtslinie und der Halbirungslinie des Winkels zwischen den Richtungen *ad* und *bd*, deren Werthe, wie aus nachstehender Tabelle ersichtlich ist, nicht sehr weit von einander abweichen. Ihre Differenz giebt eine Vorstellung von der Mangelhaftigkeit der Centrirung des Auges.

Auge	Winkel	
	Licht von der Nasenseite.	Licht von der Schlafenseite.
A	3°47′	4°57′
B	5°6′	8°12′
C	5°43′	7°44′

Das arithmetische Mittel zwischen diesen beiden Winkeln kann man ansehen als den Winkel zwischen der Gesichtslinie und derjenigen Geraden im Auge, die wenigstens annähernd als Symmetrieaxe des Auges gelten kann.

VIERTES CAPITEL.

Das schematische Auge.

I. Die Kardinalpunkte des schematischen Auges.

Aus den Bestimmungen des vorigen Capitels geht hervor, dass das menschliche Auge keineswegs ein vollkommenes centrirtes System sphärischer Trennungsflächen zwischen verschieden brechenden durchsichtigen Medien darstellt, wie es in den Entwickelungen des ersten Capitels vorausgesetzt wird. Sowohl die Kugelgestalt als die Centrirung der Flächen des Auges steht weit zurück hinter der unserer künstlichen optischen Werkzeuge. Es ist ferner zu bemerken, dass nur bei ziemlich enger Pupille und für Objektpunkte, die nicht weit seitwärts von der Axe liegen, die einschränkenden Bedingungen erfüllt sind, unter welchen die im ersten Abschnitte entwickelten Regeln Geltung haben. Da nun aber für die zunächst um die Scheitel herumliegenden Theile der Trennungsflächen die Abweichungen von der Kugelgestalt nur klein sein können und auch wenigstens eine annähernde Centrirung statthat, so ist es jedesfalls gestattet, fürs erste auf das Auge die für ein centrirtes System sphärischer Trennungsflächen gültigen Regeln anzuwenden, um eine annähernd richtige Vorstellung vom Gange der Lichtstrahlen durch dasselbe zu erhalten.

Zu diesem Zwecke hat Helmholtz aus dem mitgetheilten Material ein System von Werthen der einzelnen Constanten in abgerundeten Zahlen ausgewählt, das sicher im Bereiche der normalen individuellen Schwankungen gelegen ist und das also einem wirklichen Auge zukommen könnte. Wir wollen dies System als schematisches Auge bezeichnen.

Die gewählten Werthe sind folgende:

Brechungsindex der Luft	1
Brechungsindex der wässrigen Feuchtigkeit	$^{103}/_{77}$
Brechungsindex der Linsensubstanz	$^{16}/_{11}$
Brechungsindex des Glaskörpers	$^{103}/_{77}$

Halbmesser der Hornhautkrümmung	8 mm.
Halbmesser der vorderen Linsenkrümmung	10 „
Halbmesser der hinteren Linsenkrümmung	6 „
Abstand des vorderen Linsenscheitels vom Hornhautscheitel	3,6 „
Abstand des hinteren Linsenscheitels vom Hornhautscheitel	7,2 „

Es mag bemerkt sein, dass schon vor mehr als dreissig Jahren Listing aus dem damals vorliegenden Material von sehr unvollkommenen Messungen mit überaus glücklichem Takte ein schematisches Auge kombinirt hat, das nur wenig von dem obigen abweicht.

Nach dem Erscheinen von Helmholtz's Arbeiten sind von seinen Schülern und von andern neueren Forschern insbesondere von Woinow, Knapp, Becker, Mauthner, Hirschberg zahlreiche ophthalmometrische Untersuchungen an lebenden Augen angestellt. Ihre Resultate würden vielleicht gestatten ein neues System von optischen Constanten zu bilden, das mit noch grösserem Rechte als das Helmholtz'sche schematische Auge Anspruch machen könnte, das mittlere normale menschliche Auge darzustellen. Ich habe mich gleichwohl nicht zu dieser Neuerung entschliessen können. Die Helmholtz'schen Werthe, die sich leicht dem Gedächtnisse einprägen, haben sich mit Recht in alle Darstellungen eingebürgert und würde eine neue Auswahl nur verwirren, ohne doch einen wesentlichen Vortheil zu bringen, da die neu zu wählenden Werthe doch nur sehr wenig von den Helmholtz'schen verschieden sein könnten. Diese widersprechen keiner einzigen wesentlichen Erscheinung des Sehens.

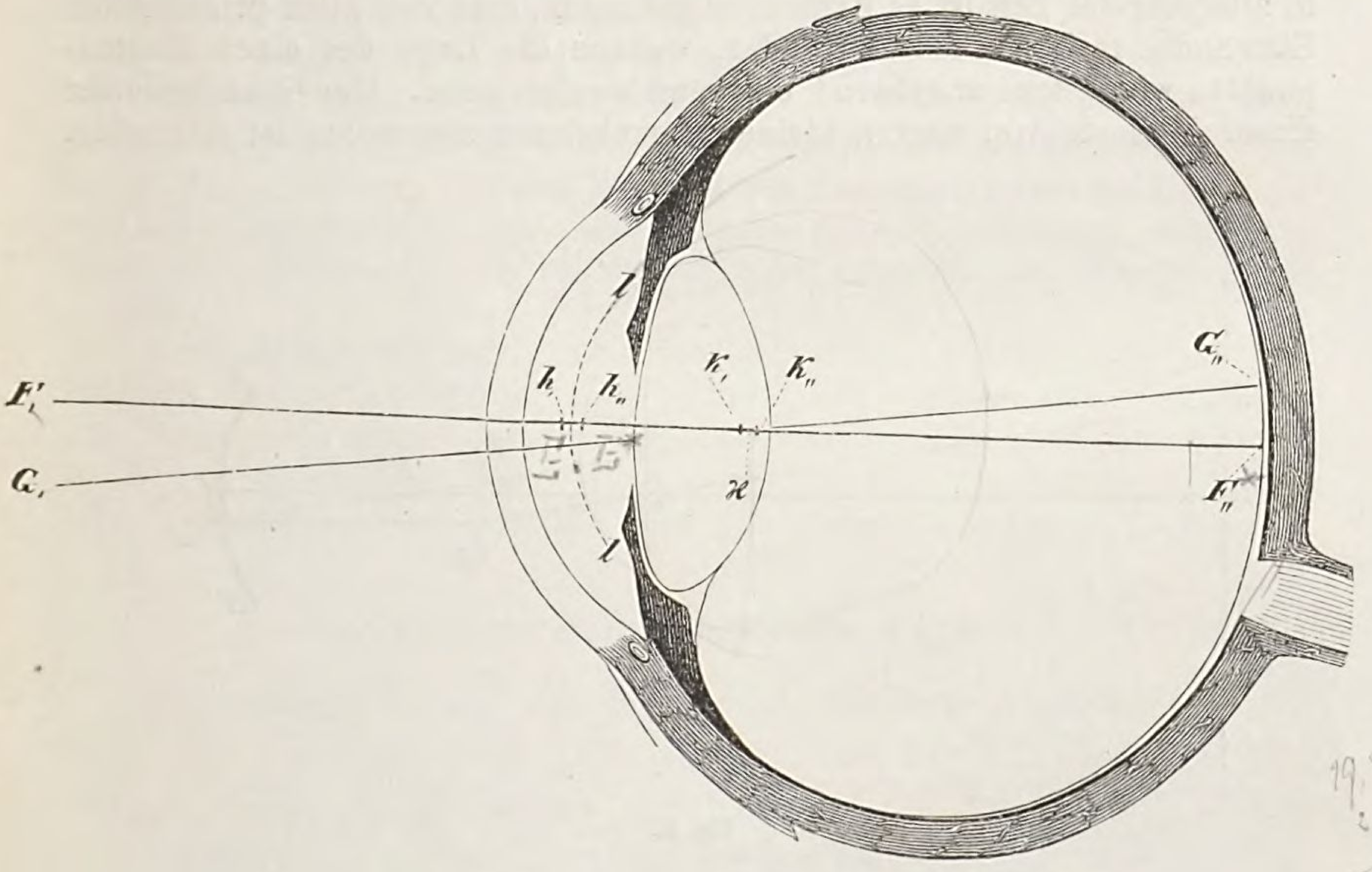
Wenn man das System der gewählten Constanten in die Rechnung S. 23 f. einsetzt, so ergiebt sich die Lage der Kardinalpunkte in der Axe des Auges wie folgt. Dabei ist als Anfangspunkt der Scheitel der Hornhaut genommen und die Coordinate eines Punktes positiv gerechnet, wenn der Punkt hinter der Hornhaut, negativ, wenn er vor der Hornhaut in der Luft liegt:

Erster Brennpunkt	F . . .	— 12,92
Erster Hauptpunkt	E	1,94
Zweiter Hauptpunkt	E^*	2,36
Erster Knotenpunkt	K	6,95
Zweiter Knotenpunkt . . .	K^*	7,37
Zweiter Brennpunkt	F^*	22,23
Erste Brennweite $= E - F$.	f	14,86
Zweite Brennweite $= F^* - E^*$	f^*	19,87

Da, wie vorstehende Tabelle zeigt, die beiden Hauptebenen sehr nahe zusammenliegen, so kann man sie für die weiteren Construktionen zu einer einzigen verschmolzen denken, welche eine mittlere Lage einnimmt. Ebenso kann man die beiden Knotenpunkte in einen ein-

zigen verschmelzen. Diese Verschmelzung würde soviel heissen als: die sämmtlichen Brechungen in den Augenmedien bringen fast genau dieselbe Wirkung hervor, welche eine einzige Fläche hervorbringen würde, welche Luft und Glaskörper trennte, deren Scheitel im verschmolzenen Hauptpunkte läge und deren Halbmesser gleich der Entfernung des einen Hauptpunktes von dem einen Knotenpunkte wäre.

Da nun nach den obigen Angaben die Länge der Augenaxe von Pol zu Pol 23—26 mm. beträgt und da den normalsichtigen Augen im Allgemeinen gerade die kleineren Werthe der Axenlänge zukommen, so hindert uns nichts unserem schematischen Auge eine Axenlänge von 23 mm. beizulegen. Wenn man alsdann auf die Dicke der Sclerotica und Chorioidea 0,76 mm. in Abzug bringt, so fällt der hintere Brennpunkt des Auges in den Bereich der äusseren Netzhautschichten und das nächste Stück der Netzhaut um den hinteren Pol herum, soweit es noch als eben betrachtet werden kann, fällt mit der hinteren Brennebene des Auges zusammen.



Die Lage der Kardinalpunkte des schematischen Auges sowie der Trennungsflächen und der Sclerotica ist in dreifacher Vergrösserung aller Abmessungen in Fig. 13 dargestellt. *ll* ist die gedachte

einzige Trennungsfläche zwischen Luft und Glaskörper, welche annähernd dieselbe Wirkung hervorbringen würde, wie die wirklichen Brechungen im Auge. $\varkappa$ ist der verschmolzene Kreuzungspunkt $h_{,}$ und $h_{,,}$ sind die beiden Hauptpunkte, welche sonst im Text mit EE^* bezeichnet sind. $K_{,}$ und $K_{,,}$ sind die Knotenpunkte, $F_{,}$ und $F_{,,}$ die Brennpunkte. Im übrigen wird die Figur keine Erklärung bedürfen. Sie kann als Darstellung eines wagrechten Meridianschnittes durch ein rechtes Auge von oben betrachtet angesehen werden.

Den Strahl des von einem Objektpunkte ins Auge fallenden Strahlenbündels, welcher durch den ersten Knotenpunkt geht, nennt man den „Richtungsstrahl“ des Objektpunktes. Den aus der Verschmelzung beider Knotenpunkte entstehenden Punkt nennt man daher auch den Kreuzungspunkt der Richtungsstrahlen. Den Winkel zwischen den beiden Richtungsstrahlen zweier Objektpunkte nennt man den „Gesichtswinkel“ oder „Sehwinkel“, unter welchem der Abstand der beiden Objektpunkte erscheint.

Man hat sich wiederholt bestrebt einen oder den andern der Kardinalpunkte des Auges direkt am lebenden Auge zu bestimmen, aber erst in allerjüngster Zeit ist es Bernstein gelungen, eine von allen principiellen Einwänden freie Methode zu finden, wonach die Lage des einen Knotenpunktes wenigstens annähernd bestimmt werden kann. Der Grundgedanke dieser Methode von einigen kleinen Correktionen abgesehen ist folgender.

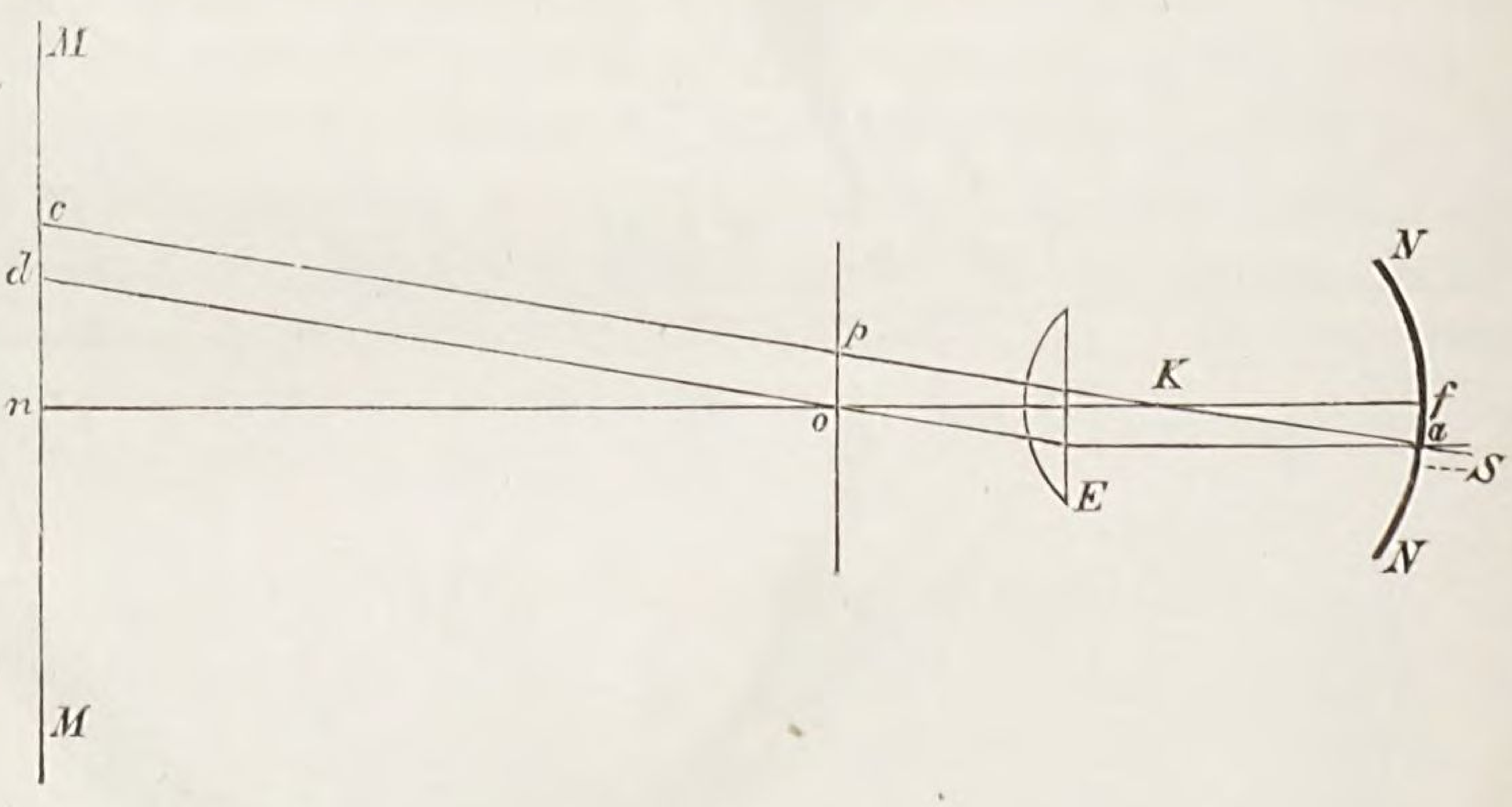


Fig. 14.

NN sei der wagrechte Meridianschnitt einer Netzhaut die mit der Brennebene zusammenfällt, bei S sei die Eintrittsstelle des Sehnerven. In nicht grosser Entfernung sei ein Fixationszeichen bei n aufgestellt und hier befinde sich senkrecht zur Gesichtslinie fn ein Maasstab MM. Längs desselben verschiebe man einen leuchtenden Punkt und merke dessen Lage c, für welche sein Bild von f aus an die Eintrittsstelle des Sehnerven

bei a kommt, was sich dadurch zu erkennen giebt, dass in diesem Augenblick der Punkt für das Auge verschwindet wie später entwickelt werden wird. Offenbar liegt der Knotenpunkt K auf der Linie $c\,a$. Jetzt wird nahe vor das Auge in genau gemessener Entfernung von der Hornhaut ein Schirm senkrecht zur Gesichtslinie gestellt mit einem feinen Löchelchen o das in die Gesichtslinie gebracht wird. Durch dasselbe fixirt wieder das Auge und zwar ohne alle Anspannung des Akkommodationsapparates das Gesichtszeichen n. Jetzt wird der leuchtende Punkt so lange verschoben bis der von ihm durch o gehende Strahl wieder den Punkt a am Rande der Eintrittsstelle des Sehnerven trifft. Die dazu erforderliche Lage sei d, dann ist offenbar, weil NN die Brennebene des Auges ist, die Richtung $d\,o$ parallel zu $c\,a$ und $d\,c = o\,p$ mithin

$$oK = \frac{o\,n}{d\,n} \cdot op = \frac{o\,n}{d\,n}\,d\,c,$$

da aber die Längen $o\,n$, $d\,n$, $d\,c$ direkt gemessen sind, kann man $o\,K$ berechnen und wenn man hiervon den Abstand des Schirmes von der Hornhaut abzieht, so hat man die Entfernung des Knotenpunktes von der Hornhaut. Da nun aber der Punkt n und der Maassstab, wie man leicht sieht, nicht sehr weit vom Auge abstehen darf, so muss das Auge zuerst ohne Schirm mit Anspannung des Akkommodationsapparates fixiren wodurch, wie schon eingangs angedeutet, eine kleine Correktion nöthig wird, eine zweite Correktion ist erforderlich, wenn man die Verschmelzung der beiden Knotenpunkte in einen einzigen nicht zulassen will. Bernstein hat nach dieser Methode an einem Auge 3 Systeme von Messungen ausgeführt, welche die sehr gut übereinstimmenden Werthe von 7,22; 7,38; 7,21 mm. für den Abstand des Knotenpunktes vom Hornhautscheitel ergaben. Wie man sieht stimmen diese Werthe auch sehr nahe zusammen mit dem für das schematische Auge berechneten Werthe dieser Grösse.

Eine andere Methode hat neuerdings Badal [1] angegeben um den Knotenpunkt zu bestimmen. Sie gründet sich auf die Bemerkung dass der Brennpunkt einer vor das Auge gehaltenen Linse mit dem Knotenpunkt zusammenfallen muss, wenn durch dieselbe gesehen dasselbe Objekt in verschiedenen Abständen unter demselben Gesichtswinkel erscheint.

II. Das emmetropische Auge.

Der optische Erfolg, der für das schematische Auge berechneten Lage der Cardinalpunkte und insbesondere der Annahme des Zusammenfallens der Polarzone der Netzhaut mit der zweiten Brennebene kann in folgenden Sätzen ausgesprochen werden: Alle parallelstrahlig einfallenden Bündel, die nur wenig schräg zur Axe verlaufen werden in Punkten der als eben betrachteten Polarzone der Netzhaut vereinigt; oder mit andern Worten: Die Bildpunkte aller Objektpunkte, deren Entfernungen als unendlich gross gegen die Brennweiten gelten

1 Gaz. d. hôpitaux 1877. p. 379 und Gaz. méd. d. Paris 1877. p. 225.

können und die gar nicht oder wenig abseits von der Axe liegen, fallen in Punkte der Polarzone der Netzhaut.

Hiermit stimmt die allgemein bekannte Thatsache überein, dass es viele Augen giebt, welche kosmische Objekte wie den Mond und die Sterne oder auch sehr entfernte terrestrische wie einen Berggipfel und dergl. vollkommen deutlich sehen, was ja die Entstehung eines deutlichen Bildes in Coincidenz mit einer Netzhautschicht zur Voraussetzung hat. Man pflegt diese Beschaffenheit des Auges als die eigentlich normale anzusehen, und man nennt ein Auge, bei welchem die hintere Brennebene mit der Polarzone der Netzhaut zusammenfällt, ein „emmetropisches“.

Es verdient ausdrücklich hervorgehoben zu werden, dass die bis jetzt angestellten Betrachtungen gar nichts aussagen über den Gang derjenigen Strahlenbündel durch das Auge, welche von weit abseits der Axe gelegenen Punkten ausgegangen sind, denn auf solche sehr schräg durch ein System centrirter Trennungsflächen gehende Strahlen leiden die Gesetze des ersten Abschnittes keine Anwendung. Es verdient aber andererseits auch hervorgehoben zu werden, dass diese sehr schräg ins Auge gelangenden Strahlenbündel zum eigentlichen genauen Sehen so gut wie gar nicht beitragen, weil, wie später noch zu erörtern sein wird, nur ein sehr kleines Netzhautstück um den hinteren Pol herum so organisirt ist, dass dicht nebeneinander liegende Elemente unterscheidbare Empfindungen vermitteln können. Wie ausserordentlich begrenzt dieser fein organisirte Netzhautbezirk ist, kann man leicht durch folgenden Versuch erfahren. Man lege ein Buch mit gewöhnlicher Druckschrift in etwa 25 cm. Entfernung vor das Auge, bedecke es mit einem weissen Blatt Papier, auf welchem ein Punkt als Fixationszeichen angebracht ist, nun rücke man für einen Moment das bedeckende Blatt fort und schiebe es sofort wieder an seine vorige Stelle. Man wird dann schwerlich mehr als ein Wort von 5 mm. Länge deutlich lesen können, was einem Gesichtswinkel von etwas über 1^0 entspricht. Wenn also ein Objektpunkt nur soweit abseits der Axe liegt, dass sein Richtungsstrahl mit der Gesichtslinie (die hier als Axe gelten muss) einen Winkel von etwas über $\frac{1}{2}^0$ macht, so fällt der Bildpunkt schon auf Theile der Netzhaut, die für so genaues Sehen, wie es zum Lesen erforderlich ist, nicht mehr geeignet sind. Aus dem bloss dioptrischen Gesichtspunkt würden sicher weit mehr seitlich gelegene Objektpunkte noch zulässig sein. Wir sind somit berechtigt, fürs erste die schräg einfallenden Strahlenbündel noch ganz ausser Acht zu lassen und noch einige weitere Betrachtungen anzustellen, die sich in aller Strenge

nur auf Objektpunkte beziehen, deren Richtungsstrahlen sehr kleine Winkel mit der Axe bilden. Das Sehen der Objekte, deren Bilder ganz nahe an den Pol der Netzhaut fallen und das, wie soeben erörtert wurde, allein ein genaues ist, nennt man das „direkte Sehen“. Im Gegensatze hierzu wird das Sehen weiter von der Axe entfernt gelegener Objekte das „indirekte Sehen“ genannt.

Lassen wir jetzt einen Objektpunkt oder ein in einer zur Axe senkrechten Ebene befindliches System von Objektpunkten aus der unendlichen Ferne an ein emmetropisches Auge heranrücken, so wird das System von entsprechenden Bildpunkten aus der zweiten Brennebene also aus der Retina nach hinten herausrücken. Die konvergirenden Strahlenkegel werden also nicht mehr zur wirklichen Vereinigung kommen, sondern schon vor der Spitze in mehr oder weniger grossen Kreisen — sogenannten Zerstreuungskreisen — von der Netzhaut geschnitten werden. Indem mehrere solche Zerstreuungskreise, die benachbarten Objektpunkten entsprechen, in einander übergreifen und somit nicht mehr jeder Netzhautpunkt nur von einem leuchtenden Punkt aus erregt wird, können nicht mehr ebensoviele Objektpunkte durch gesonderte Empfindungen unterschieden werden, als es selbständig empfindende Stellen in dem beleuchteten Netzhautstücke giebt. Das heisst mit anderen Worten das Sehen hat nicht mehr den Grad von Deutlichkeit, welcher bei vollkommen scharfen optischen Bildern erreichbar ist.

Diese Undeutlichkeit des Sehens wird indessen noch nicht sehr merklich solange die Entfernung des Objektes vom emmetropischen Auge zwar endlich aber noch sehr gross ist. In der That ist ja das Herausrücken des Bildes aus der hinteren Brennebene bei der gedachten Bewegung des Objektes anfangs sehr langsam, so dass die Kreise, in welchen die Retina die Strahlenkegel schneidet der Spitze noch sehr nahe liegen und folglich unmerklich kleine Durchmesser haben. Selbstverständlich hängt übrigens die Grösse der Zerstreuungskreise auf der Netzhaut ausser von der Entfernung ihrer Ebene von den Spitzen der Lichtkegel in der Bildebene noch ab von der Basis dieser Kegel, welche für alle durch die Pupille gebildet wird oder genauer gesprochen durch das von der Linse entworfene optische Bild der Pupille. Nachstehende Tabelle giebt unter Voraussetzung eines Pupillendurchmessers von 4 mm. eine Anzahl von zusammengehörigen Werthen der hier in Betracht kommenden Grössen. Die erste im Sinne der früheren Bezeichnungsweise mit $p-f$ überschriebene Spalte giebt an, wie weit das Objekt von der vorderen Brennebene absteht. Die zweite mit p^*-f^* überschriebene Spalte giebt

an wie weit das Bild hinter der hinteren Brennebene liegt und endlich liefert die dritte *d* überschriebene Spalte die Werthe für den Durchmesser der Zerstreuungskreise.

$p - f$	$p^* - f^*$	d
∞	0	0
10000 mm.	0,029 mm.	0,006 mm.
5000 „	0,059 „	0,013 „
2500 „	0,118 „	0,025 „
1250 „	0,236 „	0,050 „
625 „	0,472 „	0,099 „
312 „	0,946 „	0,193 „
156 „	1,893 „	0,369 „
78 „	3,786 „	0,675 „
39 „	7,571 „	1,000 „
19 „	15,541 „	1,819 „
0 „	∞ „	4,000 „

Aus dieser Tabelle ersieht man, dass der Durchmesser des Zerstreuungskreises kleiner als 1/100 mm. ist, sowie die Entfernung des Objektpunktes etwas über 5000 mm. beträgt. So kleine Zerstreuungskreise können aber der Deutlichkeit des Sehens um so weniger Eintrag thun, als eine absolute Schärfe der Bilder auch bei unendlicher Entfernung der Objektpunkte doch nicht stattfindet aus Gründen, die erst später zu erörtern sind. Man wird also folgern können, dass unser emmetropisches schematisches Auge alle Objekte, die mehr als 5 Meter von ihm abstehen mit gleicher Deutlichkeit sieht. Rücken aber die Objekte noch näher an das Auge, so wird Undeutlichkeit bemerkbar und zwar wächst dieselbe bei weiterer Annäherung mit beschleunigter Geschwindigkeit.

Zur Erklärung der Thatsache, dass vom emmetropischen Auge endlich entfernte Objekte, wenn ihre Entfernung nur eine gewisse Grösse übersteigt, mit unendlich fernen gleich deutlich gesehen werden, hat man auch den Umstand geltend gemacht, dass die Schicht der empfindenden Netzhautelemente eine gewisse Dicke besitzt und dass daher, wenn die Bilder unendlich ferner Objekte in die Vorderfläche dieser Schicht fallen die Bilder von Objekten, deren Entfernung zwar endlich aber über eine gewisse Grenze hinaus gross ist, noch in den Bereich jener Schicht fallen. Krüss[1] hat aus der bekannten Dicke der muthmasslich durch Licht reizbaren Netzhautschicht die Grenzdistanz für eine 3,3 mm. weite Pupille zu 13,5 m. berechnet. Hiergegen lässt sich indessen einwenden, dass wenn auch hinten nur ein reizbares Netzhautelement von einem leuchtenden Punkte Strahlen erhält, vorn doch schon mehrere benachbarte davon getroffen werden. Man wird daher doch immer wieder darauf zurückkommen, die gleiche Deutlichkeit des Sehens unendlich entfernter und

1 Ann. d. Physik CLVII. S. 476.

weit entfernter Objekte einfach zu erklären aus der Unwirksamkeit sehr kleiner Zerstreuungskreise.

III. Das myopische und das hypermetropische Auge.

Die oben gemachte Annahme, dass die Polarzone der Netzhaut mit der zweiten Brennebene zusammenfällt, war offenbar eine unter unzähligen möglichen, denn es ist an sich denkbar, dass die Netzhaut mehr oder weniger vor, sowie auch dass sie mehr oder weniger hinter der zweiten Brennebene liegt. Betrachten wir zunächst einen Fall der letzten Art. Die von unendlich entfernten Objektpunkten ausgegangenen Strahlenbündel kommen in Punkten der zweiten Brennebene zur Vereinigung und werden sich also bis sie die jetzt dahinter gedachte Netzhaut erreichen schon wieder ein wenig ausgebreitet haben, so dass sie auf der Netzhaut Zerstreuungskreise beleuchten und ein so beschaffenes Auge wird mithin unendlich entfernte Objekte nicht deutlich sehen. Dagegen wird es jetzt offenbar einen gewissen endlichen Abstand geben, in welchem ein System von Objektpunkten in einer zur Axe senkrechten Ebene liegen muss, wenn die entsprechenden Bildpunkte in die Polarzone der Netzhaut fallen sollen und das Auge wird in diesem endlichen Abstande gelegene Objekte deutlich sehen können. Nehmen wir beispielsweise an, der Netzhautpol läge nicht wie vorhin vorausgesetzt wurde 22,23 mm. sondern 22,56 mm. hinter dem Hornhautscheitel, dann ist der Abstand der Polarzone der Netzhaut von der zweiten Hauptebene = 20,2 mm. und wir können nun leicht eine Objektdistanz p von der ersten Hauptebene finden, zu welcher dieser Abstand als Bilddistanz p^* gehört, wir brauchen nur in die Grundformel 20,2 für p^* einzusetzen und p zu berechnen. Man hat so die Gleichung

$$\frac{14,86}{p} + \frac{19,87}{20,2} = 1,$$

woraus sich $p = 909$ in runder Zahl ergiebt. Das heisst mit andern Worten 909 mm. von der ersten Hauptebene abstehende Objektpunkte liefern Bildpunkte auf die Polarzone der Netzhaut des gedachten Auges oder dies Auge kann in etwa 909 mm. Abstand liegende Objekte deutlich sehen. Diese Entfernung nennt man die „Sehweite“ des Auges. Liegen dagegen die Objektpunkte viel weiter als 909 mm., so werden sie undeutlich gesehen, weil ihre Bildpunkte vor der Netzhaut entstehen, und liegen die Objektpunkte viel näher als 909 mm., so kann sie das Auge nicht deutlich sehen, weil dann die Bildpunkte hinter der Netzhaut entstehen und wieder auf der Netzhaut Zerstreuungskreise beleuchtet werden.

Solche Augen, bei denen im ruhenden Zustande die Polarzone der Netzhaut hinter der zweiten Brennebene liegt und die daher nicht in unendliche Ferne, wohl aber in eine bestimmte endliche Entfernung deutlich sehen, giebt es nun wirklich und man nennt sie „myopische“ Augen. Die Eigenschaft der „Myopie“ ist eine mathematische Grösse, welche verschiedener Grade fähig ist, denn die Netzhaut kann verschieden weit hinter der zweiten Brennebene liegen. Gleiche Brennweiten vorausgesetzt wird offenbar die Sehweite um so kleiner sein, je weiter die Netzhaut hinter der hinteren Brennebene liegt. Die Entfernung dieser beiden Ebenen von einander eignet sich indessen nicht zum Maass der Myopie, da man sie im Leben nicht messen kann und noch dazu diese Entfernung allein ohne Kenntniss der Brennweiten noch keine vollständige Kenntniss vom Refraktionszustande des Auges geben würde. Gleichwohl ist es für die Augenheilkunde ein Bedürfniss, die Grade der Myopie lebender Augen numerisch darzustellen. Es kann keinen Augenblick zweifelhaft sein, dass man den numerischen Ausdruck für die Myopie eines Auges von seiner leicht bestimmbaren Sehweite abhängig machen muss, aber diese Grösse selbst kann offenbar den Maassstab nicht abgeben, da man umgekehrt ein Auge um so myopischer nennt, je kleiner seine Sehweite ist. Man muss also zum numerischen Ausdruck eine Grösse wählen, welche um so grösser ist je kleiner die Sehweite. In der That ist man auf Donders' Vorschlag übereingekommen den reciproken Werth der Sehweite P d. h. $\frac{1}{P}$ zum Maass der Myopie zu machen. Dadurch erscheint der als Emmetropie bezeichnete Refraktionszustand des Auges als ein bestimmter Werth von Myopie nämlich als der Werth

$$\frac{1}{\infty} = 0.$$

Es mag noch bemerkt werden, dass die Augenärzte bei Angabe der Myopiegrade nicht das Meter, sondern allgemein den pariser Zoll [1] als Längeneinheit annehmen. Da schwerlich Augen vorkommen, deren Sehweite kleiner ist als ein pariser Zoll, so erscheint der Werth der Myopie stets als ein positiver ächter Bruch dessen Zähler die Einheit und dessen Nenner die Anzahl von pariser Zollen ist, welche die Sehweite des Auges beträgt.

Aus einer Conkavlinse treten bekanntlich parallelstrahlig auffallende Bündel als divergente aus und zwar mit solcher Divergenz als

1 Auf dem ophthalmologischen Congress zu Heidelberg im Jahre 1875 ist übrigens von Donders der Vorschlag gemacht in Zukunft auch für die Messung der Refraktionszustände des Auges das Metermaass zu Grunde zu legen. Die Einheit wird als „Dioptrie“ bezeichnet so dass z. B. einem Auge von 0,5 m. Sehweite der Werth von 2 Dioptrieen zukommt.

kämen sie von Punkten die in einem der (negativen) Brennweite der Linse gleichen Abstande vor derselben liegen. Man sieht daher leicht, dass auf der Retina eines myopischen Auges von unendlich fernen Objekten deutliche Bilder entstehen, wenn vor dasselbe noch eine Zerstreuungslinse gesetzt wird, deren negative Brennweite ihrem absoluten Werthe nach gleich ist der Sehweite des Auges vermindert um den Abstand der Linse vom Auge, oder wenn dieser gegen jene vernachlässigt werden darf einfach der Sehweite des Auges. Die optischen Werkstätten pflegen die Brennweiten ihrer Brillengläser in pariser Zollen anzugeben, gerade desswegen ist man auch für die Angabe der Myopiegrade beim pariser Zoll als Längeneinheit geblieben.

Stellen wir uns jetzt einen Fall der zweiten Art vor, wo die Netzhaut vor der hinteren Brennebene liegt. Dann werden unendlich entfernte Objekte ebenfalls nicht deutlich gesehen werden, weil die von ihren Punkten ausgegangenen Strahlenbündel erst hinter der Netzhaut zur Vereinigung kommen. Noch weniger können aber jetzt in irgend einem endlichen Abstande gelegene Punkte deutlich gesehen werden, da die von solchen ausgegangenen Strahlenbündel sogar erst hinter der zweiten Brennebene also noch viel mehr hinter der Netzhaut zur Vereinigung kommen. Augen von solcher Beschaffenheit giebt es ebenfalls wirklich und man nennt sie „hypermetropische". Um zu sehen wie ein Objektpunkt liegen müsse, um von einem hypermetropischen Auge deutlich gesehen werden zu können wollen wir in unserem schematischen Auge den Netzhautpol beispielsweise nur 21,86 statt 22,23 mm. hinter dem Hornhautscheitel denken, dann ist sein Abstand von der zweiten Hauptebene 19,5 mm. und die Netzhaut liegt etwa 0,37 mm. vor der zweiten Brennebene. Fragen wir in welchem Abstand p von der ersten Hauptebene ein Objektpunkt liegen müsse, damit sein Bild in die Netzhaut falle, so haben wir nur wieder den Abstand der Netzhaut von der zweiten Hauptebene als Bildabstand p^* in die Grundgleichung einzuführen und den zugehörigen Werth von p zu suchen; aus

$$\frac{14{,}86}{p} + \frac{19{,}87}{19{,}5} = 1$$

ergiebt sich aber $p = -781$ mm. Das Minuszeichen vor dem Werthe von p deutet an, dass es nicht die Distanz eines vor dem Auge gelegenen reellen, sondern die eines hinter dem Auge gelegenen virtuellen Objektpunktes ist. Da für jedes hypermetropische Auge nach der Definition das einzusetzende p^* kleiner als f^* also

$$\frac{f^*}{p^*} > 1$$

ist, so wird sich für ein solches immer eine negative Sehweite p ergeben d. h. ein hypermetropisches Auge kann kein reelles Objekt deutlich sehen. Ein hypermetropisches Auge kann sich aber die für es deutlich sichtbaren virtuellen Objekte sehr leicht verschaffen, wenn es sich mit einer Sammellinse bewaffnet. In der That verwandelt ja eine solche parallelstrahlig auffallende Bündel in konvergente und zwar liegen die Konvergenzpunkte um ihre Brennweite von der Linse entfernt. Betrachtet also ein hypermetropisches Auge unendlich ferne Objekte durch eine Sammellinse deren positive Brennweite gleich ist dem absoluten Werthe der negativen Sehweite vermehrt um den Abstand zwischen Linse und erster Hauptebene, so wird es jene unendlich fernen Objekte deutlich sehen, da die von der Sammellinse entworfenen reellen Bilder in der richtigen negativen Sehweite des Auges zu Stande kommen würden.

Gemäss dem bei der Myopie schon angewandten Principe wird man zweckmässig als numerisches Maass der Hypermetropiegrade wieder die reciproken Werthe der Sehweiten verwenden, da aber diese negativ sind, so hat die Hypermetropie stets eine negative Zahl zum Maass. Dies ist auch insofern konsequent und gerechtfertigt, als offenbar die Myopie durch die Emmetropie ($= o$) in die Hypermetropie stetig übergeht.

Um nach dem aufgestellten Maassprincipe den Grad der Myopie oder Hypermetropie eines Auges wirklich durch eine Zahl darzustellen, muss man Methoden haben, nach denen sich die Sehweite eines Auges bestimmen lässt. Ist die Person der das Auge angehört geübt ihre sinnlichen Eindrücke genau zu beachten und die Thätigkeit des später zu beschreibenden Akkommodationsapparates auszuschliessen, so bedarf es weiter keines Apparates als einiger schwarzer Striche von verschiedner Breite auf weissem Papier und eines Maassstabes um die Entfernung des Papierblattes vom Auge zu messen. In der That wird eine solche Person, wenn man das Blatt mit den Strichen aus grosser Entfernung heranrückt, angeben können, wann zuerst die Striche scharf begrenzt erscheinen, welche in dieser Entfernung überhaupt gesehen werden können. Werden solche Proben mit Annäherung und Entfernung der Objekte wiederholt, so werden sich allerdings kleine Unterschiede in den gemessenen Abständen zeigen, auf die deutlich gesehen wird. Dies liegt daran, dass eben eine sehr kleine Undeutlichkeit nicht wahrgenommen werden kann, also jedes Auge von einer gewissen Entfernung an bis zu einer gewissen andern hin mit merklich gleicher Deutlichkeit sieht. Diese beiden Grenzen der Sehweite, wenn man so sagen darf, liegen um so

enger beisammen je kleiner sie in absolutem Werthe ist. Sind diese Grenzen für ein individuelles Auge bestimmt, so ist das arithmetische Mittel ihrer reciproken Werthe als numerisches Maass des Refraktionszustandes zu nehmen. Ist das zu prüfende Auge ein hypermetropisches, so muss es natürlich eine Sammellinse von bekannter Brennweite vor sich nehmen und die Objekte müssen ausserhalb der Brennweite vor der Linse verschoben werden. Die Lage des reellen Bildes, das hier als virtuelles Objekt dient, ergiebt sich dann leicht aus der Brennweite und dem Abstande des wirklichen Objektes von der Linse.

Da der praktische Augenarzt oft in der Lage ist die Sehweite bei Personen zu bestimmen, welche sich von ihren sinnlichen Wahrnehmungen nicht genau Rechenschaft zu geben gewöhnt sind, so hat man besondere Methoden ersonnen, um die Undeutlichkeit der Bilder solchen Personen auch dann zum Bewusstsein zu bringen, wenn sie zu klein ist um von selbst aufzufallen. Künstliche Vorrichtungen zu diesem Zwecke nennt man Optometer.

Eine der verbreitetsten optometrischen Vorrichtungen beruht auf dem sogenannten Scheiner'schen Versuch. Dieser besteht darin, dass man einen leuchtenden Punkt durch zwei feine Löchelchen in einem dicht vor dem Auge befindlichen Schirm betrachtet. Der Abstand der beiden Löchelchen von einander muss so klein sein, dass die beiden vom leuchtenden Punkte durch sie fallenden Strahlen durch die Pupille gehen. Befindet sich der leuchtende Punkt in der deutlichen Sehweite, so werden die beiden gedachten Strahlen denselben Punkt der Netzhaut treffen, da ja unter dieser Voraussetzung alle von jenem Punkte aus in die Pupille gelangenden Strahlen auf einen Punkt der Netzhaut vereinigt werden. Das Auge wird also einen leuchtenden Punkt zu sehen glauben. Befindet sich dagegen der leuchtende Punkt nicht in der deutlichen Sehweite, so werden die beiden Strahlen nicht denselben Punkt der Netzhaut treffen, da der Bildpunkt jetzt vor oder hinter der Netzhaut liegt. Das Auge glaubt jetzt natürlich zwei leuchtende Punkte vor sich zu sehen, da zwei gesonderte Elemente der Netzhaut erregt werden. Ist der Abstand des leuchtenden Punktes kleiner als die Sehweite, so liegt der Bildpunkt hinter der Netzhaut und die beiden Strahlen haben sich also noch nicht gekreuzt wenn sie die Netzhaut treffen, der Strahl, welcher durch das Löchelchen rechter Hand gegangen ist trifft also die Netzhaut rechts und der durch das Löchelchen linker Hand gegangene Strahl trifft sie links. Das Bewusstsein setzt aber die Ursache eines links gelegenen Punktes der Netzhaut nach rechts im Raume und umgekehrt, da wegen der Verkehrtheit der deutlichen Netzhautbilder

in der Regel links gelegene Netzhauttheile von rechts her, rechts gelegene von links her erregt zu werden pflegen. Von der Projektion der Ursachen von Lichtempfindungen überhaupt wird in einem späteren Abschnitte ausführlicher zu handeln sein. Die beiden scheinbaren leuchtenden Punkte entsprechen also jetzt übers Kreuz den beiden Löchelchen und wenn man das Löchelchen rechter Hand zudeckt wird der scheinbare Lichtpunkt links verschwinden und vice versa. Ist dagegen der leuchtende Punkt weiter entfernt als die Sehweite, so kreuzen sich die beiden Strahlen schon vor der Netzhaut und der durch das Löchelchen rechter Hand gegangene beleuchtet einen Punkt links auf der Netzhaut und umgekehrt. Aus dem vorhin angegebenen Grunde entsprechen daher jetzt die beiden scheinbaren Lichtpunkte den Löchelchen in ihrer Lage so, dass wenn man das Löchelchen rechter Hand verdeckt der scheinbar rechts gelegene Lichtpunkt verschwindet und vice versa. Sowie also Doppelbilder erscheinen, kann man wissen ob der leuchtende Punkt zu nah oder zu fern liegt, wenn man weiss ob dem Geprüften bei Verdeckung des Löchelchens rechter Hand das Scheinbild links oder rechts verschwindet. Fig. 15 wird ohne weitere Erklärung das Gesagte deutlich machen.

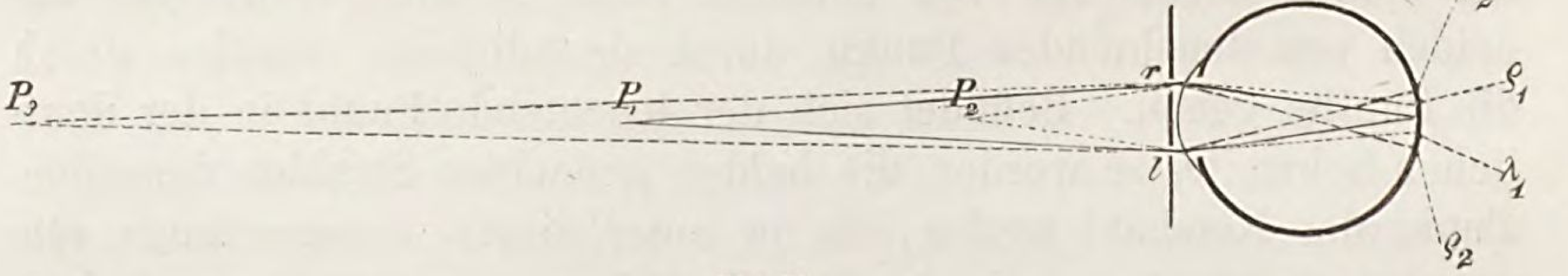


Fig. 15.

An die Stelle des leuchtenden Punktes kann man auch eine leuchtende Linie setzen, wenn ihre Richtung die Verbindungslinie der beiden Löchelchen senkreckt überkreuzt. Ferner kann man statt der Löchelchen auch zwei Spalten in dem Schirm verwenden, deren Richtung der leuchtenden Linie parallel ist. In dem auf dies Princip gegründeten Optometer dient als leuchtende Linie ein feiner Spalt in einem dunklen Schirm vor einem sehr ausgedehnten hellen Hintergrunde. Der Schirm bildet den Boden eines Rohres, welches in einem andern wie ein Fernrohrauszug verschoben werden kann, so dass der Schirm in jeden beliebigen Abstand von dem Ende des äusseren Rohres gebracht werden kann. An diesem Ende befindet sich nun das zu prüfende Auge dicht hinter einem die Oeffnung verschliessenden Schirm mit zwei zum erstgedachten parallelen Schlitzen. Verschiebt man jetzt das eine Rohr im andern, so wird das geprüfte Auge nur eine Lichtlinie zu sehen glauben, wenn der Spalt vom Auge

um die Sehweite absteht, dagegen zwei, wenn der Spalt zu weit oder zu nahe steht. Wenn es nun gilt auch grosse Sehweiten zu bestimmen, so müsste das Rohr eine unbequeme Länge haben, negative Sehweiten würde man gar nicht bestimmen können. Diese Uebelstände sind aber sehr leicht zu vermeiden, wenn man in das weitere Rohr dicht vor dem am Auge befindlichen Schirm mit Doppelspalt eine Sammellinse von etwa 6 Zoll Brennweite bringt, das Rohr braucht nicht viel länger als diese Brennweite zu sein, um alle positiven und negativen Sehweiten bestimmen zu können. In der That wird ja jetzt für das Auge nicht der Spalt selbst als Objekt zu betrachten sein, sondern dessen von der Linse entworfenes Bild. Dies kann man aber in jede beliebige positive und negative Entfernung vom Auge bringen. In unendlicher Entfernung insbesondere liegt es dann, wenn der Objektspalt von der Linse gerade um ihre Brennweite absteht. An das engere Rohr kann man gleich eine Scala eingraviren, welche für jede Stellung sogleich den Abstand des Linsenbildes vom Auge liefert.

Das Optometer v. GRAEFE's ist einfach ein galileisches Fernrohr (Operngucker), und es wird dem zu prüfenden Auge aufgegeben dasselbe so einzustellen, dass es ein sehr entferntes Objekt, etwa das Ziegeldach eines entfernten Hauses, deutlich sieht, so dass die Ziegel gezählt werden können. Es ist aus der Theorie des galileischen Fernrohres und aus der alltäglichen Erfahrung mit diesem in jedermanns Händen verbreiteten Instrumentes bekannt, dass die für unendliche Entfernung erforderliche Einstellung abhängt von der Sehweite des Auges, insbesondere weiss man, dass ein Auge mit kleiner Sehweite das Okular näher ans Objektiv bringen muss, um ein fernes Objekt deutlich zu sehen, als ein Auge mit grösserer Sehweite. Es ist mithin principiell klar, dass aus der Einstellung auf die Sehweite geschlossen werden kann. Wenn also an dem Auszugrohre eine geeignete Scala angebracht ist, so kann an dieser ohne Weiteres die Sehweite des Auges abgelesen werden. An den von den optischen Werkstätten gelieferten GRAEFE'schen Optometern kann man zwischen drei verschiedenen Zerstreuungslinsen als Okularen wechseln und dem entsprechend sind 3 verschiedene Skalen am Auszug angebracht; je nachdem das zu untersuchende Auge stark myopisch, schwach myopisch oder hypermetropisch ist. Wollte man nämlich für schwach myopische Augen dieselbe starke Zerstreuungslinse als Okular verwenden wie für stark myopische, so würden die Unterschiede der Einstellung für verschiedene Grade der schwachen Myopie zu gering ausfallen, um genau messbar zu sein.

Eine andere auf bloss objektive Beobachtung des Auges mit dem Augenspiegel gegründete Methode der Sehweitebestimmung kann erst später erörtert werden.

Die mit der Prüfung der Sehschärfe Hand in Hand gehenden Methoden der Optometrie können hier nicht behandelt werden, vielmehr ist bezüglich derselben auf die Darstellungen der Augenheilkunde zu verweisen.

IV. Die Bilder seitlich gelegener Objekte.

Bisher haben wir bloss den Bildern solcher Objektpunkte, deren Richtungsstrahlen sehr kleine Winkel mit der Axe bilden, eingehendere Aufmerksamkeit geschenkt. Nur ganz vorübergehend wurde bemerkt, dass auch von weit seitwärts gelegenen Objekten jedesfalls ziemlich deutliche Bilder auf der Netzhaut entstehen. Einerseits nämlich hat man dies an ausgeschnittenen Thieraugen direkt beobachtet. Andererseits würde das Sehen solcher seitlich gelegenen Objekte — das sogenannte indirekte Sehen — auch nicht einmal mit der Schärfe stattfinden können, mit welcher es wirklich geschieht, wenn nicht das von je einem seitlich gelegenen Objektpunkte ins Auge gelangende Strahlenbündel wenigstens einigermaassen auf je einen Punkt der Netzhaut vereinigt würde. Es hat daher einiges Interesse, zu untersuchen, inwieweit eine solche Entstehung annähernd deutlicher Bilder von seitlich gelegenen Objekten aus den bis jetzt bekannten und in den vorstehenden Abschnitten beschriebenen Einrichtungen des Auges erklärt werden kann. Zur Beurtheilung des Ganges sehr schräg auffallender Strahlenbündel durch ein brechendes System können, wie mehrfach hervorgehoben wurde, die im ersten Abschnitte entwickelten Regeln nicht dienen. Man kann sich aber davon eine annähernde Vorstellung verschaffen, wenn man wenigstens die eine von den im ersten Abschnitte zu Grunde gelegten einschränkenden Bedingungen aufrecht erhält, dass nämlich das Strahlenbündel eine sehr kleine Basis auf den brechenden Flächen hat, welche Bedingung bei einigermaassen enger Pupille im Auge in der That erfüllt ist. Ein solches eng begrenztes Strahlenbündel wird durch Brechung an einer kugelförmigen Trennungsfläche sehr annäherungsweise verwandelt in ein Bündel eigenthümlicher Gestalt. Um sie bequem zu beschreiben, müssen wir einige Bezeichnungen einführen. Der mittelste Strahl des von einem Punkte P (Fig. 16) ausgegangenen Bündels heisse der Leitstrahl L. Durch ihn und den Mittelpunkt der Trennungsfläche c legen wir eine Ebene,

welche die Meridianebene des Bündels heissen mag und das in ihr liegende Büschel [1] soll das Meridianbüschel des Bündels heissen, ihm gehören die Strahlen s_1 und s_2 in der Figur an. Eine auf der Meridianebene senkrechte durch den Leitstrahl gelegte Ebene heisse

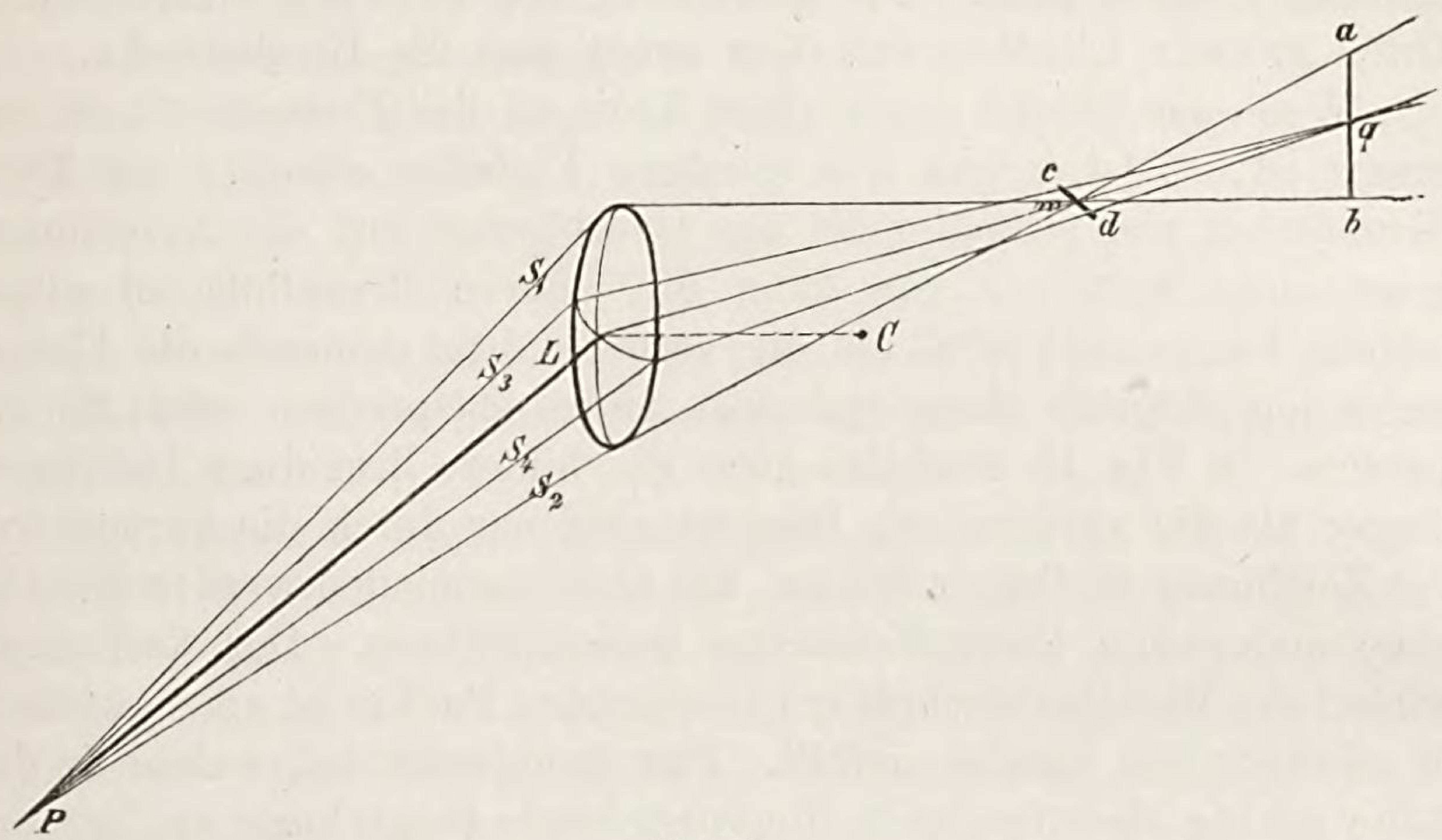


Fig. 16.

die Querebene und die darin enthaltenen Strahlen des Bündels bilden ein Büschel, das wir Querbüschel nennen wollen, dem in der Figur die Strahlen s_3 und s_4 angehören. Es vereinigen sich nun die Strahlen des Querbüschels in einem von der Trennungsfläche weiter entfernt gelegenen Punkte q des gebrochenen Leitstrahles, als die Strahlen des Meridianbüschels, welche übrigens sämmtlich auch nach der Brechung noch in der Meridianebene enthalten sind. Der Vereinigungspunkt der Strahlen des Meridianbüschels sei m. In der Entfernung, wo die Strahlen des Querbüschels zur Vereinigung kommen, gehen die sämmtlichen übrigen Strahlen des Bündels durch Punkte einer in der Meridianebene enthaltenen Strecke ab — der hinteren Brennlinie — welche durch die beiden äussersten Strahlen des hier schon wieder divergirenden Meridianbüschels begrenzt sind. Ebenso sind in der Entfernung, wo der Vereinigungspunkt des Meridianbüschels liegt, sämmtliche Strahlen vereinigt auf einer geradlinigen Strecke cd, deren Richtung senkrecht zur Meridianebene steht und die begrenzt ist durch die beiden äussersten Strahlen des Querbüschels, die hier noch nicht zur Vereinigung gekommen sind, sie

1 Ich bediene mich hier des Sprachgebrauches der synthetischen Geometrie, welche Strahlenbüschel ein System von Strahlen in der Ebene, Bündel ein solches im Raume nennt.

heisst die vordere Brennlinie. An diesen beiden Stellen findet also eine, wenn auch nicht punktuelle, so doch wenigstens auf einen unendlich schmalen Strich beschränkte Vereinigung sämmtlicher Strahlen des Bündels statt, die man auf einem Schirme objektiv zur Darstellung bringen kann. Die Entfernung *mq* zwischen diesen beiden Orten grösster Lichtkoncentration nennt man die Brennstrecke.

Wenn das Bündel durch einen Kreis an der Trennungsfläche begrenzt ist, so ist wegen des schrägen Einfalles offenbar das Meridianbüschel viel schmäler als das Querbüschel und die Anschauung zeigt ohne weiteres, dass dann die hintere Brennlinie im allgemeinen kürzer sein wird als die vordere, dass demnach die hintere mehr dem Begriffe eines optischen Bildes entsprechen wird als die vordere. In Fig. 16 erscheint zwar die hintere Brennlinie bedeutend länger als die vordere *cd*. Dies ist aber nur durch die Perspektive der Zeichnung bedingter Schein, der nicht vermieden werden konnte, ohne anderweite Undeutlichkeiten herbeizuführen. Der Oeffnungswinkel des Meridianbüschels am leuchtenden Punkte ist um so kleiner, je schräger das Bündel einfällt. Für Strahlenbündel, welche in das Auge schräg einfallen, trifft die vorstehende Bemerkung zu, insofern diese Bündel durch die mit der einen brechenden Fläche zusammenfallende kreisförmige Pupille begrenzt sind.

Bezeichnet man die Entfernung der ersten Brennlinie vom Einfallspunkt auf dem gebrochenen Leitstrahle gemessen durch f' und die der zweiten durch f'', so hat man [1]

$$f' = \frac{\frac{r}{n}(n^2 - \operatorname{Sin}^2\varphi)}{\sqrt{n^2 - \operatorname{Sin}^2\varphi} - \operatorname{Cos}\varphi - \frac{r}{e}\operatorname{Cos}^2\varphi}$$

$$f'' = \frac{nr}{\sqrt{n^2 - \operatorname{Sin}^2\varphi} - \operatorname{Cos}\varphi - \frac{r}{e}}$$

wo n den Brechungsindex, r den Radius der Trennungsfläche, e die Entfernung des Objektpunktes vom Einfallspunkt und φ den Einfallswinkel des Leitstrahles bedeutet.

Mit Hülfe dieser Formeln habe ich folgende Berechnungen ausgeführt. Zunächst wurde der Rechnung das reducirte schematische Auge zu Grunde gelegt, d. h. eine einzige trennende Kugelfläche angenommen in der S. 63 beschriebenen Weise. Dass diese einzige Kugelfläche bezüglich aller der Axe nahezu parallel einfallenden Strahlenbündel merklich dasselbe leistet, wie der wirkliche

1 Kummer, Borchardt's Journ. f. Mathem. LVII. S. 189; Hermann, Ueber schiefen Durchgang u. s. w. Gratulationsschrift an C. Ludwig. Zürich 1874.

brechende Apparat des Auges, ist weiter oben gezeigt worden. Es wurden nun 4 parallelstrahlige Bündel von kleinem Querschnitt angenommen, deren Leitstrahlen unter den Winkeln von 20°, 40°, 60°, 80° mit der Axe auf den Scheitel der Fläche fallen und für diese wurden die Lagen der gebrochenen Leitstrahlen und auf diesen die Orte der Brennlinien bestimmt.

Einer zweiten Rechnung wurde der brechende Apparat des schematischen Auges selbst zu Grunde gelegt. Es wurden wiederum 4 parallelstrahlige Bündel angenommen, deren Leitstrahlen ebenfalls nahezu Winkel von 20°, 40°, 60°, 80° mit der Axe bildeten und so auf die Hornhaut fallen, dass sie nach der Brechung an ihr durch den Scheitel der vorderen Linsenfläche oder den Mittelpunkt der Pupille gehen.

Die Resultate dieser beiden Rechungen sind in Fig. 17 genau dargestellt. Die Abmessungen des schematischen Auges sind genau 5fach vergrössert. Die punktirte Linie EE deutet den Durchschnitt der idealen Kugelfläche an, auf welche der brechende Apparat bezüglich der sehr kleine Winkel mit der Axe bildenden Strahlenbündel reducirt werden kann. Die grosse ausgezogene Kurve folgt der vermuthlichen Netzhautkurve des schematischen Auges, das emmetropisch gedacht ist, daher der zweite Hauptbrennpunkt F^* in der Netzhaut liegt.

Man sieht nun leicht, dass bezüglich der seitlich einfallenden Strahlenbündel die Fläche EE nicht im Stande sein würde, den wirklichen brechenden Apparat zu ersetzen, denn selbst die hinteren Brennlinien der Strahlenbündel 1, 2, 3, 4 links unter der Axe, nämlich die Punkte φ_1'' φ_2'' φ_3'' φ_4'' in der Figur fallen soweit vor die Netzhaut, dass auf derselben bedeutende Zerstreuungsfiguren entstehen müssten, wenn nur eine Brechung stattfände.

Dahingegen sieht man, dass die hinteren Brennlinien der 4 Strahlenbündel bei Berücksichtigung der drei Brechungen an Hornhaut, vorderer und hinterer Linsenfläche mit einer überraschenden Genauigkeit in die Netzhaut fallen. Es sind nämlich f_1'' f_2'' f_3'' f_4'' jene 4 hinteren Brennlinien für die Bündel, deren Leitstrahlen durch die vier mit 1, 2, 3, 4 bezeichneten Linien links oberhalb der Axe dargestellt sind.

Es geht hieraus hervor, dass die Lage und Krümmung der Linse ganz ausserordentlich zweckmässig angeordnet ist, um das Auge, wie man es passend bezeichnen kann, „periskopisch" zu machen. In der That wird das emmetropisch gedachte schematische Auge schon ohne Berücksichtigung der Linsenschichtung auch von weit seitlich gelegenen sehr entfernten Objekten annähernd deutliche Bilder auf der

Netzhaut haben. Sofern die grösste Concentration der seitlich enfallenden Strahlenbündel in der hinteren Brennlinie ein wenig hinter die Netzhaut fällt, könnte man sagen, dass nach der ausgeführten Be-

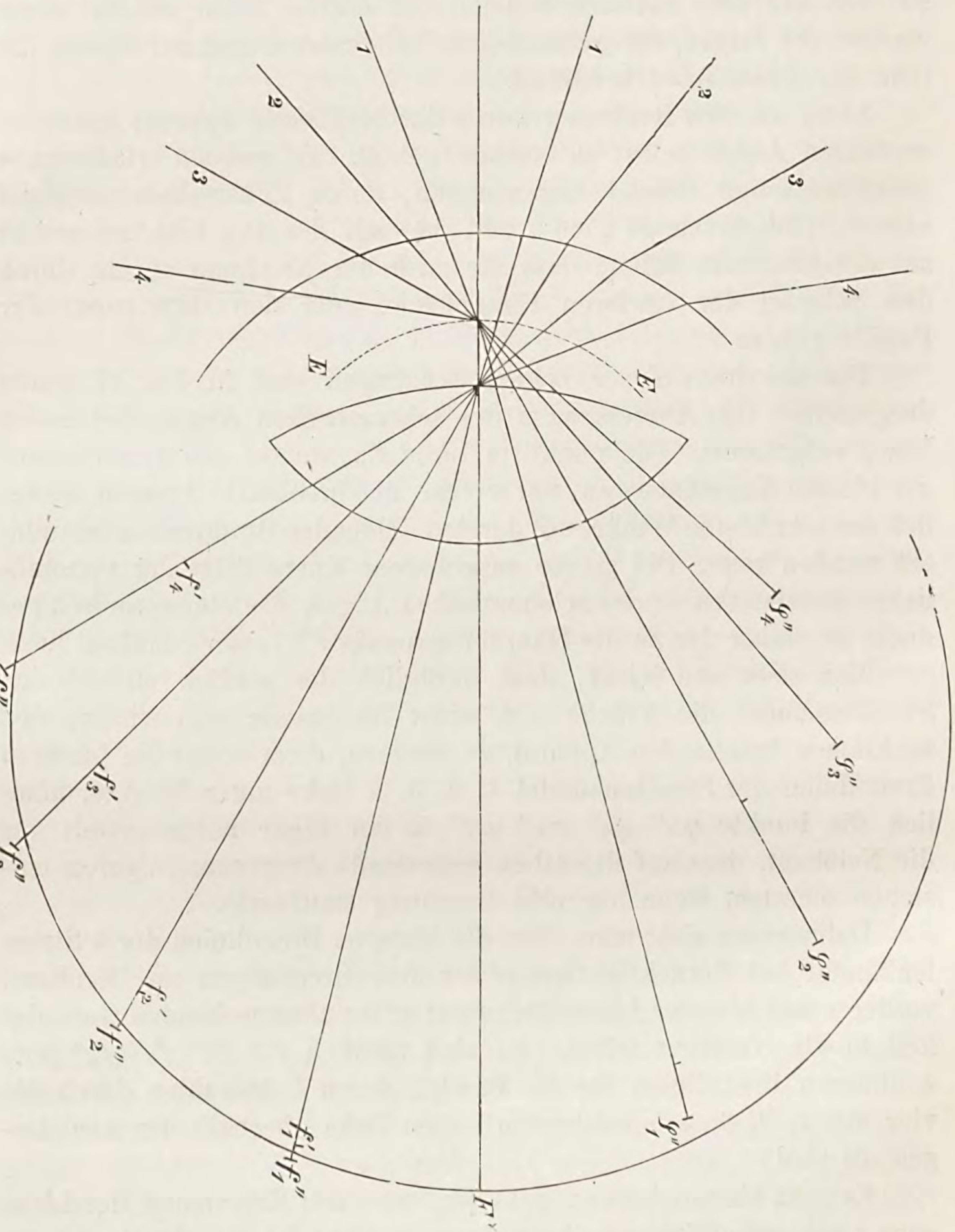


Fig. 17.

rechnung die Seitentheile eines in der Axe emmetropischen Auges etwas hypermetropisch wären, womit die Beobachtungen von Stammeshaus[1] übereinstimmen.

1 Stammeshaus, Arch. f. Ophthalmologie XX. S. 147.

Die Schichtung der Linse macht diese Bilder der seitlich gelegenen Objekte jedesfalls noch bedeutend genauer. Es ist nämlich von L. HERMANN[1] allgemein nachgewiesen, dass bei einer geschichteten Linse von der Art wie die des menschlichen Auges die Brennstrecke für seitlich einfallende Bündel kürzer ist, als für eine homogene Linse von gleicher Hauptbrennweite. Die Rechnung von HERMANN, deren Einzelheiten als zu verwickelt hier nicht angeführt werden können — ist durchgeführt unter der Annahme, dass alle Strahlen des Bündels alle Schichten der Linse durchsetzen. Noch günstiger würde sich wahrscheinlich dies Resultat stellen, wenn man dem Umstande Rechnung tragen könnte, dass nicht alle Strahlen des Meridianbüschels die sämmtlichen Schichten wirklich durchsetzen, welche von den Strahlen des Querbüschels durchsetzt werden. Betrachten wir nämlich z. B. das schräg von oben einfallende Bündel No. 3 in Fig. 17, so ist wohl anzunehmen, dass die untersten Strahlen in seinem Meridianbüschel an einigen inneren Schichten der Linse ganz vorübergehen, durch welche seine oberen Strahlen noch passiren müssen, dass also jene untersten Strahlen schliesslich weniger abgelenkt aus der Linse hervorgehen und so der Vereinigungspunkt des Meridianbüschels noch weiter hinausgerückt, d. h. dem Vereinigungspunkte des Querbüschels mehr genähert wird, und dieser also noch mehr einem genauen punktuellen Bilde ähnlich wird.

Was hier zunächst vom emmetropischen Auge gezeigt wurde, wird wohl vom myopischen auch annähernd gelten, so dass man auch bei ihm voraussetzen darf, dass von seitlich gelegenen Objekten, die um seine direkte Sehweite von ihm abstehen, sehr annähernd deutliche Bilder auf der Netzhaut entworfen werden.

Man kann jetzt noch die Frage aufwerfen, ob die Verbindungslinien der seitlich gelegenen Objektpunkte mit ihren bezieh lichen Bildpunkten auf der Netzhaut einander selbst und die Axe in demselben „Kreuzungspunkte der Richtungsstrahlen" schneiden, wo die entsprechenden Verbindungslinien der der Axe benachbarten Objektpunkte und ihrer Bildpunkte einander nahezu schneiden. Es sind über diese Frage am ausgeschnittenen Kaninchenauge von LANDOLT und NUEL[2] Versuche angestellt, welche die von Lichtflammen entworfenen Bilder auf der Sclera direkt beobachteten. Sie fanden, dass die Verbindungslinien zwischen Objektpunkt und Bildpunkt bei

1 HERMANN, Ueber schiefen Durchgang von Strahlenbündeln durch Linsen und über eine darauf bezügliche Eigenschaft der Krystalllinse. Gratulationsschrift der Züricher med. Fak. für C. LUDWIG. 1874.

2 Arch. f. Ophthalmologie XIX. Heft 3.

seitlich gelegenen Objektpunkten die Axe vor dem „Kreuzungspunkte der Richtungsstrahlen“ schneiden.

Wenn man in unserer Fig. 17 durch die Punkte $f_1'' \; f_2'' \; f_3'' \; f_4''$ Parallelen mit den einfallenden Leitstrahlen 1, 2, 3, 4 zieht, welche die Verbindungslinien zwischen Objektpunkt und Bildpunkt darstellen würden, so sieht man, dass dieselben die Axe sehr entschieden hinter dem „Kreuzungspunkte der Richtungsstrahlen“ schneiden. Doch ist offenbar die sehr verwickelte Construktion unserer Figur nicht hinlänglich genau, um diese Verhältnisse getreu wiederzugeben. Es findet sich nämlich kein ganz stetiges Weiterrücken des Schnittpunktes mit wachsendem Einfallswinkel, was doch ohne Zweifel zu erwarten wäre. Immerhin ist der Widerspruch zwischen dem Ergebniss der Construktion für das schematische Menschenauge und der experimentellen Bestimmung am Kaninchenauge beachtenswerth und kann zu Wiederholung der Bestimmungen auf beide Arten auffordern.

FÜNFTES CAPITEL.

Die Akkommodation des Auges.

I. Verschiedene Refraktionszustände desselben Auges.

Der im vorigen Abschnitte charakterisirte Refraktionszustand ist für ein und dasselbe Auge keineswegs eine zu allen Zeiten konstante Grösse. Das normale Auge kann vielmehr zu verschiedenen Zeiten sehr verschiedene Refraktionszustände willkürlich annehmen. Man überzeugt sich am leichtesten hiervon am eigenen Auge. Man halte z. B. in einiger Entfernung soweit man noch eben bequem kleine Druckschrift lesen kann ein bedrucktes Blatt und in die Hälfte der Entfernung zwischen dies und das Auge ein Stück von einem weitmaschigen Gewebe z. B. Gaze oder Tüll. Man wird bemerken dass man willkürlich bald die Buchstaben deutlich sehen kann, bald die Fäden des Gewebes. Im ersten Falle verschwimmen diese in Zerstreuungsbildern, im letzteren Falle sieht man die gedruckten Buchstaben undeutlich. Es hängt also von der Willkür ab, den Grad der Myopie zu verändern innerhalb gewisser Grenzen, in denen natürlich auch der Werth 0 und negative Werthe d. h. Emmetropie und gewisse Grade der Hypermetropie eingeschlossen sein können.

Der Versuch lässt sich auf die mannigfachste Weise variiren und man kann dabei auch die Grenzen bestimmen, innerhalb deren es eben möglich ist, den Refraktionszustand zu verändern. Diese Fähigkeit des Auges nennt man das „Anpassungsvermögen“ oder „Akkommodationsvermögen“ für verschiedene Entfernungen. Die grösste Entfernung, für welche ein gegebenes Auge einstellbar ist, nennt man seinen Fernpunktsabstand, und die kleinste Entfernung, für welche es eingerichtet werden kann, den Nahepunktsabstand. Als Fernpunkt und Nahepunkt kann man etwa zwei Punkte der nach aussen verlängerten Augenaxe definiren und zwar wäre der Fernpunkt derjenige, dessen deutliches Bild auf den Pol der Retina fällt zu der Zeit, wo das Auge seinen geringst möglichen Grad von Myopie hat und der Nahepunkt derjenige, dessen Bild ebendahin fällt, wenn der Myopiegrad des Auges auf seinen höchst möglichen Werth gesteigert ist. Selbstverständlich kann dem Fernpunktsabstand auch der Werth unendlich (Emmetropie) oder gar ein negativer Werth (Hypermetropie) zukommen. Die Differenz zwischen Fernpunktsabstand und Nahepunktsabstand oder die Strecke der Axe zwischen Fernpunkt und Nahepunkt, welche eine wesentlich positive Grösse ist, heisst das Akkommodationsspatium. Die so definirte Grösse kann unendlich sein. Wenn z. B. der Minimalwerth der Myopie des Auges = 0 (Emmetropie) ist, so reicht das Akkommodationsspatium von dem endlich gelegenen Nahepunkt bis in unendliche Ferne. Ist der Minimalwerth der Myopie gar negativ und der Maximalwerth positiv, so besteht das Akkommodationsspatium aus den beiden unendlichen Strecken der Axe von dem Nahepunkt bis in unendliche Ferne nach vorn und von dem hinter dem Auge endlich gelegenen Fernpunkt bis in unendliche Ferne nach hinten. Hier wäre also das Akkommodationsspatium die ganze unendliche Axe mit Anschluss der den Augenmittelpunkt enthaltenden endlichen Strecke vom Nahepunkt bis zum Fernpunkt.

Man bemerkt bei subjektiver Prüfung der Akkommodation des eigenen Auges ferner leicht, dass nur zum Uebergange von niederen zu höheren Graden der Myopie eine aktive Anstrengung von muskulösen resp. nervösen Apparaten erforderlich ist und dass der Nachlass dieser Anstrengung die Myopie vermindert. Hieraus folgt, dass das vollständig ruhende Auge auf seinen Fernpunkt eingestellt ist, oder so wenig myopisch ist, als es überhaupt zu sein vermag.

Die Fähigkeit, sich verschiedenen Entfernungen anzupassen, besitzen nicht alle Augen in gleichem Maasse. Von zwei im ruhenden Zustande emmetropischen Augen kann z. B. das eine im Stande sein,

bei grösster Anstrengung seiner akkommodirenden Kräfte noch in 5 Zoll Abstand deutlich zu sehen, während das andere es nur bis auf 7 Zoll Entfernung zu bringen vermag. Es ist daher vor allen Dingen wichtig, besonders für die Zwecke der praktischen Augenheilkunde ein Maassprincip zu besitzen, wonach man die Werthe des Akkommodationsvermögens verschiedener Augen vergleichen kann. Nachdem im vorigen Abschnitte bereits gelehrt wurde, die verschiedenen Refraktionszustände des Auges oder Grade der Myopie (resp. Hypermetropie) durch Zahlenwerthe auszudrücken, kann es nicht mehr zweifelhaft sein, welche Zahl als Maass eines bestimmten Akkommodationsvermögens zu dienen hat. Offenbar ist nämlich dies Maass die Differenz der beiden Zahlen, welche den Grad der Myopie bei grösster Anstrengung des Akkommodationsvermögens und bei vollständiger Ruhe desselben messen, mit anderen Worten die Differenz des reciproken Werthes des Nahepunkts- und des Fernpunktsabstandes. Nennen wir also den ersteren N, den letzteren F, so ist

$$\frac{1}{N} - \frac{1}{F}$$

das Maass des Akkommodationsvermögens. Ist der Fernpunkt unendlich weit oder das Auge in der Ruhe emmetropisch, so zieht sich diese Maasszahl auf $\frac{1}{N}$ zurück. Man entnimmt aus dieser Formel sogleich, dass ein im Ruhezustande schon sehr myopisches Auge nur ein ganz kleines Akkommodationsspatium zu beherrschen braucht, ohne dass man ihm darum ein abnorm kleines Akkommodationsspatium zuzuschreiben hätte. Nehmen wir z. B. an, dass ein im Ruhezustande emmetropisches und mit normalem Akkommodationsvermögen ausgerüstetes Auge sich durch möglichste Anstrengung desselben auf 5 par. Zoll Abstand einrichten könnte, so wäre das Maass dieses als normal angenommenen Akkommodationsvermögens

$$\frac{1}{5} - \frac{1}{\infty} = \frac{1}{5}.$$

Stellen wir uns nun ein im Ruhezustande schon myopisches Auge vor, dessen Fernpunktsabstand 7 Zoll beträgt, so würde sein Accommodationsvermögen als ein ganz normales gelten können, wenn es im Stande wäre, sich dadurch in ein Auge vom Myopiegrade $\frac{1}{2\frac{11}{12}}$ zu verwandeln, d. h. wenn sein Nahepunkt in $2'' 11'''$ Abstand läge oder sein Akkommodationsspatium nicht mehr als $7 - 2\frac{11}{12}$ oder 4 Zoll 1 Linie betrüge, während das Akkommodationsspatium des im Ruhezustande emmetropischen Auges von gleichwerthigem Akkommoda-

tionsvermögen unendlich lang ist. So paradox dies auf den ersten Blick aussieht, so wird es doch sofort verständlich, wenn man bedenkt, dass unser myopisches Auge durch Vorsetzen eines Zerstreuungsglases von 7 Zoll negativer Brennweite in einen dioptrischen Apparat verwandelt wird, der das unendliche Akkommodationsspatium von ∞ bis 5 Zoll beherrscht. In der That fallen jetzt in dem aus Auge und Zerstreuungsglas zusammengesetzten Apparate beim Ruhezustande des Auges die Bilder unendlich ferner Gegenstände auf die Netzhaut denn von einem unendlich fernen Punkt erzeugt die Linse zunächst ein virtuelles Bild in 7 Zoll Abstand von sich selbst und das Bild dieses Bildes im Auge fällt unter den gemachten Voraussetzungen auf die Netzhaut, sofern wir von dem kleinen Abstande zwischen Linse und Auge absehen. Verwandelt sich nun aber das Auge in eines von der Myopie $\frac{1}{2\frac{11}{12}}$, so sieht es mit der Linse zusammen einen 5″ abstehenden Punkt deutlich, denn von diesem erzeugt die Linse

$$\left(\text{da } \frac{1}{5} + \frac{1}{-2\frac{11}{12}} = \frac{1}{-7} \text{ ist}\right)$$

ein Bild gerade im Abstande von $2\frac{11}{12}$ Zoll, wie es das veränderte Auge zum deutlichen Sehen braucht.

Das vorstehend entwickelte Maassprincip des Akkommodationsvermögens ist von Donders in die Ophthalmologie eingeführt. Jedoch habe ich selbst schon, ehe Donders die Refraktionszustände durch die reciproken Werthe der Sehweite zu messen vorschlug, die Werthe des Akkommodationsvermögens nach demselben Princip verglichen.[1]

II. Die Veränderungen des brechenden Systemes.

Es lassen sich von vornherein verschiedene Wege denken, auf welchen der Myopiegrad des Auges erhöht werden kann. Demgemäss sind auch in der Geschichte der Wissenschaft verschiedene Ansichten über das Wesen des Anpassungsvorganges aufgetaucht, die indessen gegenwärtig, wo man das Problem vollständig gelöst hat, nur noch ein historisches Interesse haben, und nur flüchtig zu berühren sind.

Am nächsten läge offenbar die Annahme, dass die Anpassung des Auges an verschiedene Entfernungen ähnlich bewerkstelligt würde wie die Anpassung der photographischen Camera obscura, nämlich ohne Veränderung des dioptrischen Apparates durch Verschiebung

1 Siehe Fick, Medicinische Physik. 1. Aufl. S. 306 f. Braunschweig 1856.

des bildauffangenden Schirmes. In der That würde das Auge mit der Polarzone seiner Netzhaut nähere Objekte als bisher deutlich sehen, wenn diese Zone weiter von der Hornhaut wegrückte, denn bei gleichbleibenden brechenden Flächen fallen ja die Bilder näherer Objekte weiter nach hinten als die entfernterer Gegenstände. Gegen diese Annahme, der es nicht an Vertheidigern gefehlt hat, lassen sich aber schon von vornherein schwer wiegende Bedenken geltend machen. Vor allem ist ersichtlich, dass die Polargegend der Netzhaut nur durch eine Gestaltveränderung des ganzen Augapfels zum Zurückweichen gebracht werden könnte. Dazu gehörten aber bei dem grossen intraokularen Drucke sehr bedeutende äussere Kräfte. Diese könnte man nur suchen in den äusseren Augenmuskeln, besonders wohl den beiden schiefen, welche den Bulbus gürtelartig umfassen und ihn wohl in der Aequatorialzone pressen könnten, so dass die Axe von Pol zu Pol verlängert würde. Da diese Muskeln aber ganz andere Aufgaben haben, zu denen eine ausserordentliche Feinheit der Abstufung ihrer Zusammenziehung erforderlich ist, so kann man nicht wohl daran denken, ihnen auch noch diese Last aufzubürden. Ein anderes Bedenken gegen die fragliche Annahme besteht darin, dass die mit dem Zurückweichen der Polarzone nothwendig verknüpfte Verengerung der Aequatorialzone für die seitlichen Objekte die Myopie schwächen würde, während sie für die der Axe benachbarten verstärkt wird. Wenn nun auch die seitlichen Bilder für den Sehakt weit weniger wichtig sind, so ist man doch nicht gewohnt in der organischen Welt selbst in untergeordneten Punkten grelle Widersprüche gegen die Zweckmässigkeit zu finden.

Wenn nun die Anpassung für die Nähe nicht durch Verschiebung des bildauffangenden Schirmes bewerkstelligt wird, so muss sie durch Verstärkung der Strahlenablenkung im brechenden Apparate selbst bewirkt werden, derart dass der Convergenzpunkt des von einem nahen Punkte ausgehenden Strahlenbündels, der anfangs hinter die Retina fiel, nunmehr schon in dieselbe fällt. Dies würde geschehen können, entweder wenn die Brechungsindices der Augenmedien grösser würden, oder wenn eine oder mehrere brechende Flächen sich stärker wölbten, d. h. der Krümmungshalbmesser derselben eine Verkleinerung erlitte. Was die erste dieser beiden Möglichkeiten betrifft, so ist sie ohne weiteres auszuschliessen, da wir uns gar keine Vorstellung machen können, wie durch Nerveneinfluss ganz plötzlich die chemische Natur der Augenmedien Veränderungen erleiden sollte, auch ist meines Wissens nie an eine Erklärung der Anpassung durch Aenderung der Brechungsindices gedacht. Es bleibt also nur die Möglichkeit übrig

anzunehmen, dass die Krümmung der brechenden Flächen verändert werde. In erster Linie hat man wohl die Hornhautkrümmung ins Auge gefasst. Eine Aenderung derselben könnte aber wie ein Zurückweichen der Polargegend der Netzhaut nur durch eine Gestaltveränderung des ganzen Bulbus bewirkt werden und ist eine solche aus den oben angeführten Gründen schon sehr unwahrscheinlich. Es ist auch schon vor vielen Jahren von KOHLRAUSCH experimentell nachgewiesen, dass die Hornhautkrümmung bei der Anpassung für die Nähe keine Aenderung erleidet. Der Grund der vermehrten Myopie bei der Anpassung kann demnach schon von vornherein eigentlich nur in Veränderungen der Linse gesucht werden. Zur Aenderung ihrer Lage und Gestalt reichen auch schon geringe Kräfte aus, da der intraokulare Druck von allen Seiten auf dieselbe wirkt und mithin nicht als Gegenkraft in Betracht kommt. Aehnlich wie eine Verstärkung der Krümmung würde übrigens auch ein Vorschieben der ganzen Linse gegen die Hornhaut hin wirken, auch dadurch würde der Erfolg herbeigeführt werden, dass ein in der wässrigen Feuchtigkeit fortgepflanztes Strahlenbündel früher zur Vereinigung kommt. Die Annahme, dass die Anpassung für die Nähe auf dem Vorrücken der Linse beruhe, ist von HUECK sehr sorgfältig entwickelt und hat sich in der physiologischen Optik lange Zeit behauptet. Dies ist um so merkwürdiger als ihr nicht nur die Schwierigkeit einer mechanischen Erklärung des Vorrückens entgegensteht, sondern noch weit mehr der Umstand, dass die faktischen Leistungen des Accommodationsvermögens ein so weites Vorrücken fordern würden, dass es dem oberflächlichsten Blicke nicht entgehen könnte.

Obwohl nach diesen Erwägungen schon von vornherein die Anpassung des Auges für die Nähe kaum anders erklärt werden kann als durch verstärkte Krümmung der Linse, so ist doch diese Theorie in der Geschichte der Wissenschaft erst zuletzt aufgetreten. Nachdem zuerst M. LANGENBECK beiläufig bemerkt hatte, dass die von den Linsenflächen gelieferten Reflexbilder bei der Anpassung für die Nähe Veränderungen erleiden, haben später CRAMER in Holland und HELMHOLTZ gleichzeitig und unabhängig von einander in exakter Weise durch Beobachtung dieser Veränderungen nachgewiesen, dass die Anpassung des Auges für die Nähe bewerkstelligt wird durch Zunahme der Krümmung beider Linsenflächen, so jedoch, dass vorzugsweise die vordere Linsenfläche stärker gewölbt wird und dass der hintere Linsenscheitel merklich an Ort und Stelle verbleibt.

Wir folgen bei der ausführlicheren Darstellung den Untersuchungen von HELMHOLTZ, die an denselben Augen angestellt sind, an

welchen auch die in den bisherigen Abschnitten schon gebrauchten Messungen ausgeführt wurden.

Vor Allem ist eine schon ohne alle besonderen Hülfsmittel zu beobachtende Aenderung des Auges kurz zu erwähnen, welche daher auch schon seit langer Zeit bekannt ist. Sie besteht darin, dass sich beim Nahesehen die Pupille verengert. Man sieht dies sofort am eigenen Auge im Spiegel oder an einem fremden Auge, wenn man nur dafür sorgt, dass vor und während des Aktes der Anpassung für die Nähe das Auge nicht durch allzu helle Beleuchtung geblendet ist, so dass die Pupille beim Sehen in die Ferne einigermaassen weit ist.

Man kann ferner bemerken, dass der Pupillarrand nicht nur enger wird, sondern auch vorrückt. Zu diesem Ende beobachte man ein Auge von der Seite und sogar noch ein wenig von hinten, so dass es einen Anblick etwa wie Fig. 18 *a* darbietet. Man bemerkt darin, als schwarzen Streif neben dem Sklerarande das verzerrte Bild der Pupille und als schwarzen beiderseits spitz auslaufenden Streif c_1 c_2 dem Profil der Hornhaut entlang das verzerrte Bild der beschatteten Innenseite des über die Iris vortretenden Randes der Sklera in der abgewandten Hälfte des Auges. Zwischen diesen beiden schwarzen Streifen zieht sich durch die Hornhaut gesehen ein hellerer farbiger Streif hin — das verzerrte Bild der abgewandten Irishälfte. Dieser hellere Streif wird nun schmäler sowie sich das beobachtete Auge für die Nähe anpasst ohne seine Stellung zu verändern, was leicht zu erreichen ist, wenn man dem beobachteten Auge von vorn herein zwei in derselben Richtung gelegene Gesichtszeichen darbietet, eines fern und eines, am besten aus einer Nadelspitze bestehend, nahe, und nun dem Auge aufgiebt abwechselnd dem einen und dem andern die Aufmerksamkeit zuzuwenden. Das für die Nähe eingerichtete Auge bietet alsdann den Fig. 18 *b* dargestellten Anblick. Die Verschmälerung des hellen Zwischenraumes zwischen den erwähnten beiden schwarzen Streifen kann unmöglich durch die vorhin erwähnte Verengerung der Pupille bedingt sein, denn durch diese wird ja die Iris breiter und es müsste also auch ihr Bild sich verbreitern. Ebenso müsste eine etwaige Drehung des Auges nach der Seite des Beob-

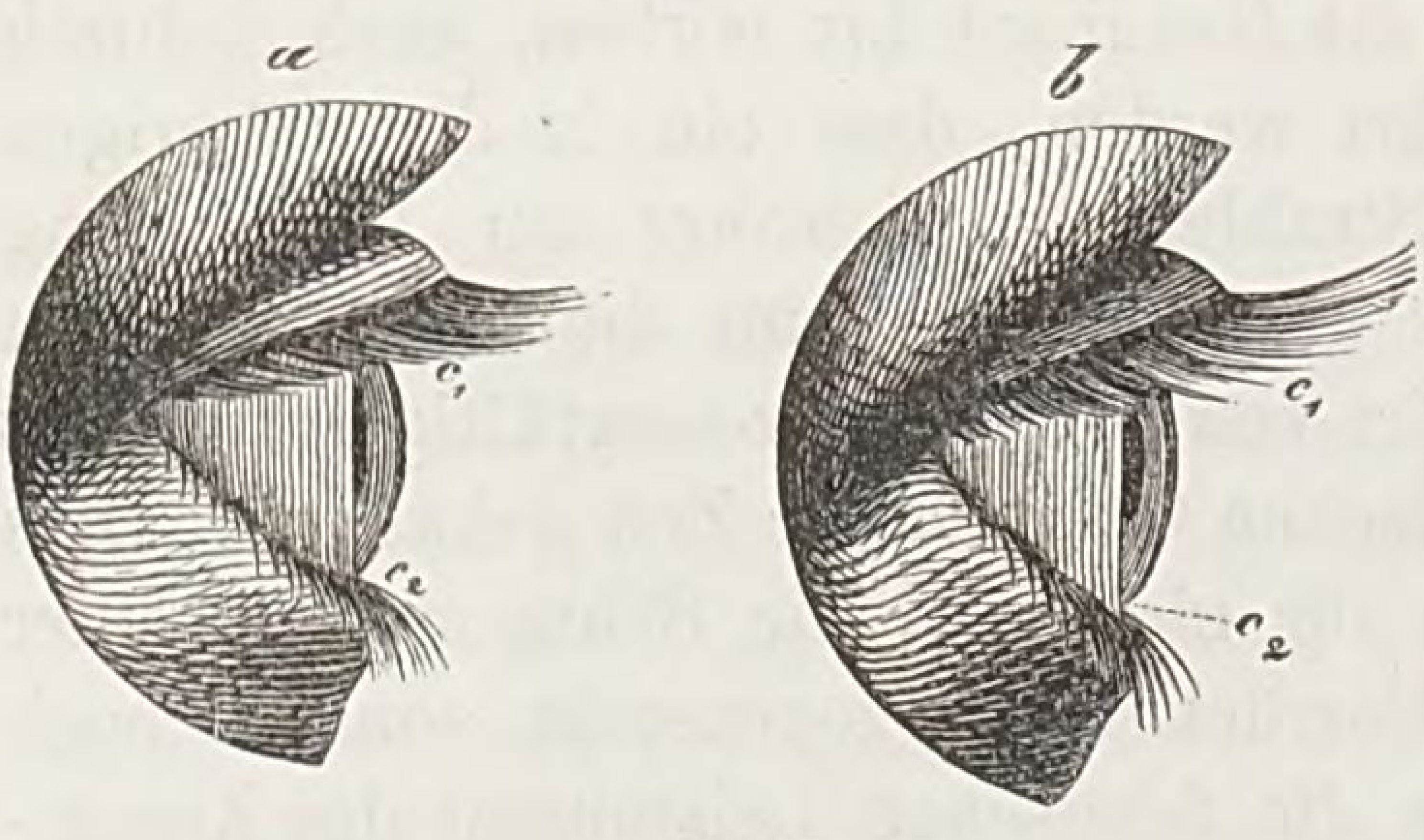


Fig. 18.

achters den Streif breiter machen. Seine Verschmälerung kann nur durch das Vorrücken des Pupillarrandes gegen die Hornhaut bedingt sein. Bisweilen wird auch noch zwischen dem schwarzen Bilde der Pupille und dem Sklerarande ein wenig von der diesseitigen Hälfte der Iris beim Nahesehen sichtbar.

Man kann sogar den Betrag des Vorrückens der Pupillarebene wenigstens annähernd schätzen, wenn man bei dem Auge zuvor die Maasse der Hornhaut und die Lage der Pupillarebene beim Fernsehen bestimmt hat. Es sei Fig. 19 *ab* der Pupillendurchmesser beim Fernsehen und man beobachte das Auge aus einem solchen Standpunkte, dass die Pupille gerade eben ganz hinter dem Sklerarande bei *c* verschwindet, dann ist die Linie *cb* vollständig bekannt als die in das beobachtete Auge wie ein Strahl hineingebrochene Gesichtslinie des Beobachters.

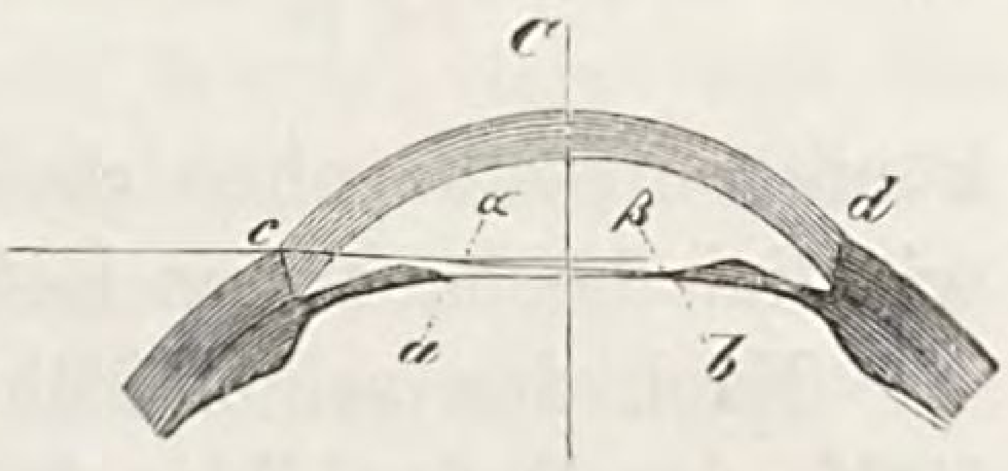


Fig. 19.

Bei Einrichtung des beobachteten Auges für die Nähe wird nun die etwas verengerte Pupille, deren Durchmesser $\alpha\beta$ bezeichnet ist, ganz oder zum Theil für den Beobachter sichtbar. In der Figur ist angenommen, dass sie eben gerade ganz sichtbar geworden ist, dann muss also der eine Endpunkt ihres Durchmessers in die Linie *cb* fallen und der Durchmesser ganz vor derselben liegen, und wenn man die Länge des Durchmessers kennt, kann man seine Lage construiren, mithin messen, um wie viel er nach vorn gerückt ist. Tritt nicht die ganze Pupille eben gerade sichtbar hervor, so muss man den sichtbar werdenden Theil abschätzen und auf diese Schätzung die Construction gründen. Auf diese Weise fand Helmholtz beim Auge *A* ein Vorrücken der Pupillarebene um 0,36 und beim Auge *B* ein Vorrücken um 0,44 mm.

Hat man vor das zu beobachtende Auge in der S. 55 beschriebenen Anordnung Lichtflammen aufgestellt, so dass man deren Reflexbilder an der Hornhaut und den beiden Linsenflächen sieht, so bemerkt man an den beiden letzteren eine Verkleinerung, sowie sich das beobachtete Auge für die Nähe einrichtet, und zwar ist die Verkleinerung am Bildchen von der ersten Linsenfläche sehr bedeutend, dagegen am Bildchen von der hinteren Linsenfläche kaum wahrnehmbar. Das Hornhautbildchen bleibt vollkommen unverändert. Zur Veranschaulichung der Grösse dieser Veränderungen kann die Fig. 20 dienen. Die schwarzen Kreisflächen stellen die Pupille des Auges beim Fernsehen *A* und beim Nahesehen *B* dar mit den darin erscheinenden 3 Reflexbildchen. Als Objekt dienen zwei quadratische

Oeffnungen in einem Schirm, die durch dahinter stehende Flammen hell leuchtend gemacht sind. *a* ist in beiden Theilen der Hornhautreflex, *b* der Reflex von der vorderen, *c* der von der hinteren Linsenfläche. Man sieht wie das erste Linsenbild *b* beim Nahesehen fast um die Hälfte verkleinert wird. Es lässt sich zeigen, dass blosses Vorrücken der vorderen Linsenfläche eine Verkleinerung dieses Reflexes bedingen würde, doch könnte dieselbe ohne gleichzeitige Krümmungsänderung niemals den wirklich beobachteten Betrag erreichen.

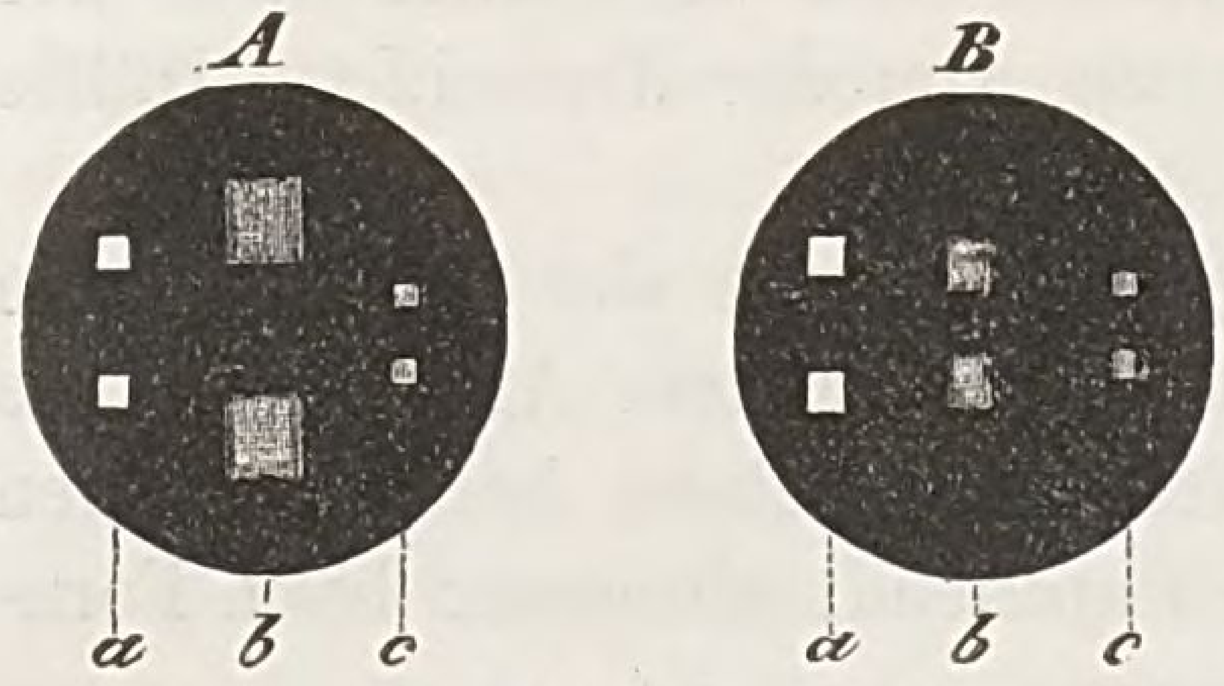


Fig. 20.

Nach den schon früher beschriebenen Methoden kann man mit Hülfe der Reflexbilder für das nahe sehende Auge die Krümmungshalbmesser der Linsenflächen und die Lage ihrer Scheitel ebenso bestimmen, wie dies für das ruhende oder fernsehende Auge schon geschehen ist. Auf diese Weise fand Helmholtz den Krümmungshalbmesser der vorderen Linsenfläche in dem oben S. 56 mit *A* bezeichneten Auge beim Nahesehen = 8,6 mm., und in dem mit *B* bezeichneten Auge beim Nahesehen = 5,9 mm. Beim Fernsehen war in denselben Augen der Halbmesser der vorderen Linsenfläche = 11,9 und = 8,8 gefunden. Die Abnahme des Halbmessers der hinteren Linsenfläche ist von Helmholtz nicht quantitativ bestimmt worden, weil zu viele hypothetische Faktoren in die Rechnung eingehen würden. Er begnügte sich mit dem Nachweis, dass eine Verkleinerung dieses Halbmessers von sehr geringem Betrage stattfinde.

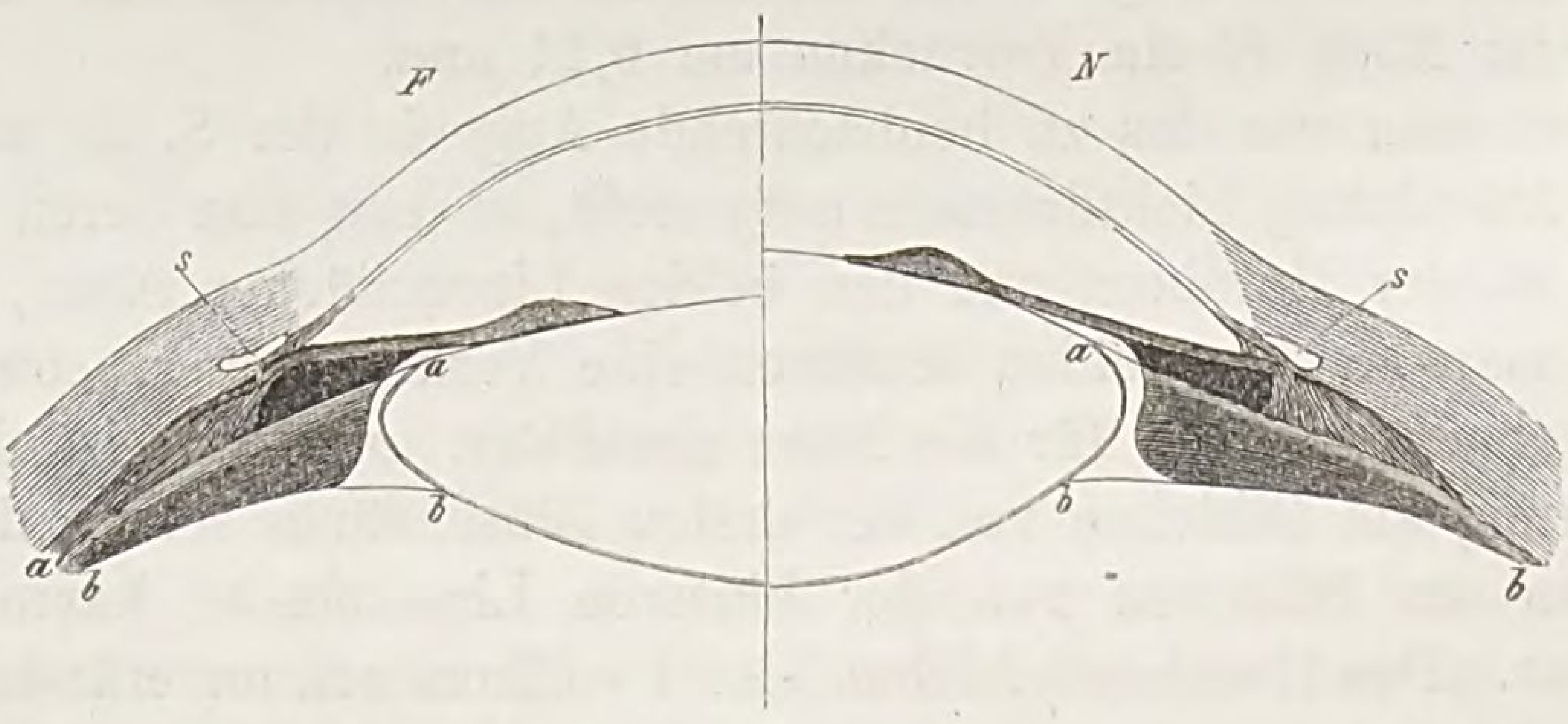


Fig. 21.

Da nun, wie schon ausgeführt, der hintere Linsenscheitel an Ort und Stelle verbleibt, der vordere aber ein wenig vorrückt (beim

Auge A um etwa 0,36, beim Auge B um etwa 0,44 mm.), so kann man sich von der grössten Veränderung, welche ein normales Auge durch volles Aufgebot der Akkommodationsfähigkeit erleidet, eine deutliche Vorstellung machen. Eine Anschauung davon gibt Fig. 21, wo die vorderen Theile des Auges den gefundenen Messungen entsprechend, in 5facher Vergrösserung dargestellt sind und zwar links unter F so wie sie beim Fernsehen, rechts unter N so wie sie beim Nahesehen beschaffen sind.

Durch ähnliche Abrundung der aus den Messungen am nahesehenden Auge hervorgegangenen Zahlen wie sie S. 61 an den für das fernsehende Auge gefundenen angebracht wurde, kann man ein akkommodirtes schematisches Auge bilden und seine Cardinalpunkte berechnen. Die so von Helmholtz gewählten Werthe sind mit den S. 61 u. 62 gegebenen Werthen für das fernstehende schematische in der nachstehenden Tabelle zusammengestellt.

	Akkommodation für	
	die Ferne	die Nähe
Angenommen:		
Brechungsindex der wässrigen Feuchtigkeit	$^{103}/_{77}$	$^{103}/_{77}$
Brechungsindex der Linsensubstanz	$^{16}/_{11}$	$^{16}/_{11}$
Brechungsindex des Glaskörpers	$^{103}/_{77}$	$^{103}/_{77}$
Krümmungshalbmesser der Hornhaut	8,0	8,0
Krümmungshalbmesser der vorderen Linsenfläche	10,0	6,0
Krümmungshalbmesser der hinteren Linsenfläche	6,0	5,5
Ort des vorderen Linsenscheitels	3,6	3,2
Ort des hinteren Linsenscheitels	7,2	7,2
Berechnet:		
Ort des vorderen Brennpunktes	— 12,107	— 11,241
Ort des ersten Hauptpunktes	1,940	2,033
Ort des zweiten Hauptpunktes	2,356	2,492
Ort des ersten Knotenpunktes	6,957	6,515
Ort des zweiten Knotenpunktes	7,373	6,974
Ort des hinteren Brennpunktes	22,231	20,248

Wenn man jetzt annimmt, dass das schematische Auge im ruhenden d. h. fernsehenden Zustande emmetropisch ist, so kann man leicht berechnen, für welchen Abstand es eingestellt ist, wenn es die Veränderungen erlitten hat, welche durch die Zahlen der zweiten Spalte unserer Tabelle dargestellt sind. In der That annehmen, das fernsehende Auge sei emmetropisch, heisst annehmen, dass der Pol seiner Netzhaut mit dem zweiten Brennpunkte zusammenfällt, d. h. 22,231 mm. hinter dem Hornhautscheitel liegt. Hier muss er dann aber auch nach den Veränderungen bleiben und man kann sich fragen in wel-

cher Entfernung p muss ein leuchtend gedachter Punkt der Axe vom ersten Hauptpunkt liegen, damit sein Bild, 22,231 mm. hinter die Hornhaut fällt, wenn die in der zweiten Spalte der Tabelle aufgeführten Data gelten. Um die gesuchte Grösse p zu berechnen, bedenken wir erstens, dass der Abstand des Netzhautpoles vom zweiten Hauptpunkte des für die Nähe eingerichteten Auges 22,231—2,492 also 19,739 mm. beträgt. Dieser Abstand muss aber als Bildabstand dem gesuchten Objektabstand p entsprechen, d. h. mit ihm und den Brennweiten des nahesehenden Auges in der bekannten Beziehung stehen, die durch die Gleichung

$$\frac{f}{p} + \frac{f^*}{p^*} = 1$$

(s. S. 19) gegeben ist. Nun ist aber für das nahesehende schematische Auge $f = 11{,}241 + 2{,}033 = 13{,}274$ mm. und $f^* = 20{,}248 - 2{,}492 = 17{,}756$ mm. Man hat also p zu berechnen aus der Gleichung

$$\frac{13{,}274}{p} + \frac{17{,}756}{19{,}739} = 1$$

und es ergiebt sich = 132,08 mm. Das heisst also mit andern Worten, wenn das schematische Auge im fernsehenden Zustande emmetropisch ist, so ist es bei Aufgebot seiner ganzen Akkommodationskräfte für etwa 132 mm. oder für ungefähr 5 pariser Zoll Entfernung eingestellt, und das Maass des Akkommodationsvermögens würde unter Annahme der in obiger Tabelle verzeichneten Veränderungen ungefähr $\frac{1}{5} - \frac{1}{\infty}$ oder ungefähr $\frac{1}{5}$ sein. Da nun dieser Zahlwerth in der That den beobachteten Leistungen eines normalen Akkommodationsvermögens etwa entspricht, so genügen die vorstehend gemachten Annahmen vollkommen, um es zu erklären, und es zeigt sich kein Bedürfniss noch nach anderen Veränderungen im Auge zu suchen.

III. Mechanismus der Akkommodation.

Nachdem die Veränderungen des dioptrischen Apparates, welche das Auge myopischer machen, erkannt sind, entsteht die Frage, durch welche Kräfte sie bewirkt werden. Da die Veränderung willkürlich ist, also unter dem Einflusse des Gehirns geschieht, so ist von vornherein kaum zweifelhaft, dass sie durch die Kräfte von Muskeln bewirkt werde, welche ihre motorischen Nerven aus dem Hirn erhalten. Die wirksamen Muskelfasern müssen offenbar im Inneren des Augapfels liegen, da die äusseren Augenmuskeln nicht eine Gestaltveränderung der Linse bewirken könnten, ohne die Gestalt des ganzen

Bulbus zu ändern, welche, wie wir gesehen haben, ganz unverändert bleibt. Nun haben wir zwar im Inneren des Augapfels glatte Muskelfasern kennen gelernt, nämlich in der Iris den Kreismuskel und den Dilatator, sowie im vorderen Abschnitte der Chorioidea den musculus ciliaris; es ist aber keineswegs auf den ersten Blick ersichtlich, in welcher Weise eine Zusammenziehung eines dieser Muskeln die beschriebenen Veränderungen der Linse hervorbringt.

Von den beiden Forschern, welche unabhängig von einander die Vorwölbung der vorderen Linsenfläche als Ursache der Anpassung für die Nähe bewiesen haben, sind zwei verschiedene Hypothesen zur Erklärung des Mechanismus aufgestellt. Cramer schreibt den Muskelfasern der Iris die Hauptrolle dabei zu, indem er annimmt, dass diese Membran nicht nur mit ihrem Pupillarrande, sondern in grösserer Breite der vorderen Linsenwölbung aufliegt. Wenn sich nun die radialen und Kreisfasern der Iris gleichzeitig zusammenziehen, so soll durch das Streben der vorgewölbten Iris sich bei wachsender Spannung abzuflachen, ein Druck auf den Rand der Linse ausgeübt werden, welcher die Mitte derselben in die Pupille vorzuquellen zwänge. Hiernach würde sich das ruhende und das akkommodirte Auge in übertriebener schematischer Darstellung so ausnehmen, wie *R* und *A* Fig. 22. Cramer hat zwar diese Hypothese durch Versuche an Seehundsaugen zu stützen gesucht, deren vordere Theile er vor und nach Zerschneidung der Iris elektrisch reizte, doch dürften dieselben kaum beweisend sein, da die Augen zu sehr verstümmelt zur Beobachtung kamen. Für das Auge des Menschen und der meisten Säugethiere kann auch schon auf Grund der anatomischen Verhältnisse kaum an einen solchen Anpassungsmechanismus gedacht werden. Immerhin könnte es sein, dass bei dem zum abwechselnden Sehen in Luft und Wasser einer kolossalen Anpassungsfähigkeit bedürftigen Seehundsauge der von Cramer beschriebene Vorgang wirklich vorkäme.

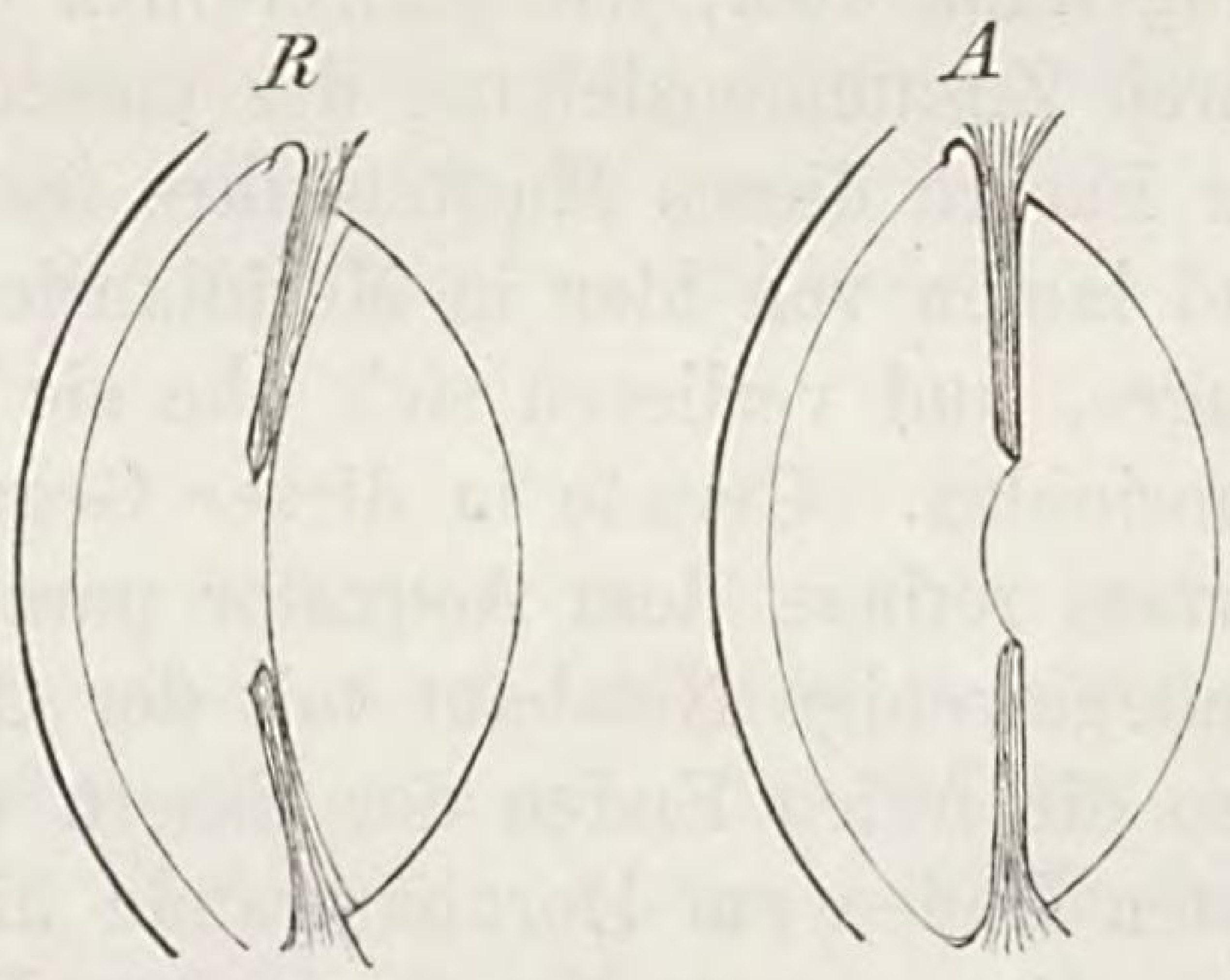


Fig. 22.

Ganz anders erklärt Helmholtz die Vorwölbung der Linse durch Muskelwirkung. Er legt die Annahme zu Grunde, dass die Linse im ruhenden Auge nicht diejenige Gestalt besitzt, welche dem Gleichgewicht ihrer eigenen elastischen Kräfte entspricht. Vielmehr würde

die Linse, wenn man sie aus ihrer Umgebung befreite, sich selbst überlassen dicker auf beiden Seiten stärker gewölbt sein und mithin, da das Volum konstant sein muss, einen entsprechend kleineren Randumfang haben. Im lebenden ruhenden Auge sei die Linse durch eine in der zonula Zinnii vorhandene radiale Spannung in der Richtung ihrer Randdurchmesser gedehnt und von vorn nach hinten entsprechend abgeplattet. Die Annahme einer fortdauernden elastischen Spannung in einem Organe, die durch die Ernährungsbedingungen unverändert aufrecht erhalten wird, hat an sich durchaus nichts paradoxes; sehen wir doch derartige Spannungen in fast allen lebenden Geweben. Zur Stütze seiner Annahme über die Gleichgewichtsfigur der Linse macht HELMHOLTZ noch besonders darauf aufmerksam, dass alle frühere Messungen an Leichenlinsen eine grössere Dicke ergeben haben als seine und Anderer Messungen an Lebenden. Da man nun kaum annehmen kann, dass die früheren Forscher zufällig sehr dicke die späteren an lebenden untersuchenden Forscher zufällig sehr dünne Linsen zu Gesicht bekamen, so liegt die Annahme nahe, dass die Linse aus dem Zwange ihrer Umgebungen befreit dicker wird.

Wenn wir diese Voraussetzung zugeben, so ist klar, dass auch im lebenden Auge die Linse sich stärker wölbt, sowie der abflachende Zug der zonula Zinni abnimmt. Eine solche Abnahme dieser Spannung kann aber, wie HELMHOLTZ behauptet, hervorgebracht werden durch Zusammenziehung des musculus ciliaris. In der That haben die Fasern dieses Muskels ihre festen Punkte am Rande der Cornea und laufen von hier in Meridianrichtungen gegen den Aequator des Auges, und verlieren sich ehe sie diesen erreichen im Gewebe der Chorioidea. Gerade in dieser Gegend aber, wo die sogenannte ora serrata retinae dem Aequator parallel verläuft, ist die bloss noch bindegewebige Netzhaut mit der Chorioidea fester verklebt. Wenn also die freien Enden der Fasern des musculus ciliaris gegen ihre festen Enden am Hornhautrande hingezogen werden, so wird sich auch die ora serrata etwas dem Hornhautrande nähern und damit wird die radiale Spannung der zonula Zinnii, wofern eine solche vorhanden war, nachlassen und der Linse Freiheit geben, sich ihrer natürlichen Gleichgewichtsfigur zu nähern. Die Ciliarfortsätze sollen dabei nach einigen Autoren vor- nach anderen zurücktreten.

Dieser von HELMHOLTZ nur vermuthungsweise ausgesprochene Vorgang ist von HENSEN und VÖLKERS[1] am Hundsauge, sowie später auch am Auge der Katze, des Affen und an einem ausge-

[1] HENSEN und VÖLKERS, Experimentaluntersuchung über den Mechanismus der Akkommodation. Kiel 1868 und Arch. f. Ophthalmologie XIX. 1. Abth.

schnittenen menschlichen Auge experimentell beobachtet worden. Der beweisendste Versuch dieser Forscher bestand darin, dass sie eine feine Nadel durch die Sklera in die Chorioidea einstiessen, da wo der Ciliarmuskel schon sein Ende erreicht hat. Wenn sie nun die Ciliarnerven oder das Ganglion ciliare elektrisch reizten, so bewegte sich das frei herausstehende Ende der Nadel merklich nach hinten, wodurch eine Verschiebung der chorioidea unter der Sklera nach vorn erwiesen ist, indem die Nadel in der Sklera ihren festen Drehpunkt hat. Auch konnten sie durch ein in die Sklera vorn eingeschnittenes Fensterchen nach Abtragung der betreffenden Theile des Ciliarkörpers durch ein an den Wundrand der Sklera angelehntes Glasfädchen dessen Spitze sich auf die freigelegte Zonula stützte das Verrücken derselben bei Reizung der Ciliarnerven beobachten. Das positive Ausfallen dieses Versuches ist um so beweisender, als der freigelegte Streif der Zonula nur noch durch die zu beiden Seiten unter den unverletzten Scleratheilen liegenden Fasern des Ciliarmuskels mitgenommen werden konnte.

Die Versuche von HENSEN und VÖLKERS ergeben ausser der Bestätigung der HELMHOLTZ'schen Theorie vom Mechanismus der Anpassung noch den Beweis dafür, dass der Ciliarmuskel vom ganglion ciliare aus innervirt wird, und zwar offenbar von Fasern, welche diesem ganglion durch seine motorische Wurzel, also aus dem nervus oculomotorius zugeführt werden. Dieser Satz wird übrigens durch zahlreiche pathologische Erfahrungen bestätigt, nach denen Lähmung des n. oculomotorius regelmässig mit Verlust des Akkommodationsvermögens verknüpft ist.

HENSEN und VÖLKERS bemerkten ferner bei ihren Versuchen, dass die Rückkehr des Akkommodationsapparates in seinen Ruhezustand beim Aufhören der Reizung stets merklich rascher geschah als der Uebergang in den möglichst angestrengten bei Beginn der Reizung. Hierüber sind auch beim Menschen Versuche durch Selbstbeobachtung angestellt, welche ein ähnliches Resultat ergeben haben. So fand VIERORDT[1] dass der Uebergang aus der Anpassung für 18 m. auf die für 0,1 m. die Zeit von 1,18″ in Anspruch nahm der umgekehrte Uebergang aber nur 0,87″ erforderte. AEBY[2] fand zum Uebergang aus dem Anpassungszustand für 0,43 m in den für 0,115 m nahezu 2″ erforderlich zum Uebergang in umgekehrtem Sinne dagegen nur 1,2″.

Diese Plötzlichkeit des Zurückspringens der bei der Anpassung für die Nähe veränderten Theile des Auges in ihre alte Lage und

1 VIERORD, Arch. f. physiol. Heilk. N. F. I. S. 17. 1857.
2 AEBY, Ztschr. f. rat. Med. 1861. N. F. XI. S. 300.

die damit sehr plötzlich zurückkehrende alte Spannung der Zonula Zinnii scheint die Ursache einer sehr merkwürdigen zuerst von PURKINJE[1] beobachteten subjektiven Lichterscheinung zu sein, welche CZERMAK[2] das „Akkommodationsphosphen" genannt hat. Sie besteht darin, dass manche Individuen beim plötzlichen Nachlassen der Anpassung für kleinsten Abstand im Dunklen einen hellen Ring aufblitzen sehen der ungefähr die in sich zurücklaufende Grenze des einäugigen Gesichtsfeldes bildet. Es muss also dieser Erscheinung eine Reizung der etwa an der ora serrata gelegenen Netzhautelemente entsprechen. Eine solche Reizung kann aber in der That bei der plötzlichen Wiederanspannung der Zonula wohl eintreten, da die im Bereich der ora serrata mit der Zonula eng verklebte Netzhaut hier in diesem Augenblicke eine Zerrung erleiden muss.

In der Regel ist die Innervation des Akkommodationsapparates verknüpft mit der der musculi recti interni, so dass Convergenz der beiden Gesichtslinien des rechten und linken Auges und Myopiegrad gleichen Schritt halten. Es sind jederzeit so genau als möglich eben die beiden Augen eingestellt für den „fixirten Punkt", welcher den Durchschnittspunkt ihrer beiden Gesichtslinien bildet. Die Verknüpfung der beiden Innervationsströme, die beide im Bereiche des n. oculomotorius fliessen, ist jedoch nicht unauflöslich. Vielmehr ist es möglich durch Uebung die Anspannung des Akkommodationsapparates von der Zusammenziehung der mm. recti interni unabhängig zu machen.

Die oben erwähnte Verengerung der Pupille[3] soll nach WEBER nur dann mit der Anpassung für die Nähe einhergehen, wenn dieselbe mit einer Vermehrung der Convergenz der Gesichtslinien verknüpft ist. Ferner ist von DONDERS[4] beobachtet, dass die Verengerung der Pupille mit der Akkommodation für die Nähe nicht ganz gleichzeitig eintritt, sondern ihr erst nachfolgt.

Immerhin ist die Pupillenverengerung im Allgemeinen eine die Anpassung für die Nähe regelmässig begleitende Erscheinung und man kann daher füglich die Frage aufwerfen ob die Verengerung der Pupille dabei für den Sehakt irgend welchen Vortheil hat, sind wir doch gewohnt, alle typischen Einrichtungen der organischen Natur „zweckmässig" zu finden. Man könnte die teleologische Bedeu-

1 PURKINJE, Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne. II. S. 125. Berlin 1825.

2 CZERMAK, Ueber das Akkommodationsphosphen. Sitzgsber. d. Wiener Acad. XXVII. S. 78. 1857.

3 Siehe Seite 88.

4 DONDERS, Pupilbeweging bij Accommodatio. Nederl. Arch. v. Genees- en Naturk. II.

tung der Pupillenverengerung etwa in folgender Betrachtung suchen. Die Grösse des Netzhautbildes hängt ab von der Entfernung des Objektes vom Knotenpunkte die Oeffnung des von einem Punkte des Objektes ausgehenden Strahlenkegels dagegen vom Abstande des Objektes von der scheinbaren Pupille. Man denke sich nun eine gleichmässig leuchtende Fläche aus der Ferne an das Auge herangerückt und dieses folge mit seiner Anpassung, so dass immer ein deutliches Netzhautbild entsteht. Offenbar würde hier die Oeffnung der von den einzelnen Punkten ausgehenden Strahlenbündel rascher zunehmen, als die Grösse des Netzhautbildes und somit würde das Netzhautbild heller werden. Man könnte nun vermuthen, dies werde kompensirt durch die bei der Annäherung des Objektes stattfindende Verengerung der Pupille. Es ist aber in Wirklichkeit dieselbe bedeutend grösser als es jene Compensation erfordert. Wir besitzen nämlich von der Pupillenverengerung beim Nahesehen sehr genaue Messungen von Olbers[1]. Er fand die in nachstehender Tabelle verzeichneten Zahlen

Entfernung des Objektes in mm.	Durchmesser der Pupille in mm.
108	4,04
216	4,93
324	5,31
432	5,62
540	5,89
648	6,07
756	6,16

Nimmt man nun die Entfernung der scheinbaren Pupille von der Hornhaut zu drei und die Entfernung des Knotenpunktes zu 7 mm. an, so ergiebt sich, dass die Helligkeit des Netzhautbildes bei Annäherung des Objektes von 648 bis auf 108 mm. im Verhältnisse von 37,3 : 17,5 abnimmt während sie nur im Verhältnisse von 1,012 : 1,073 zunehmen würde wenn die Pupillenöffnung konstant bliebe.

Die Innervation der muskulösen Elemente der tunica uvea ist von verschiedenen Forschern zum Gegenstand besonderer Untersuchungen gemacht worden, und es ist ausser den schon gelegentlich ausgesprochenen Sätzen hierüber noch folgendes festgestellt. Der Oculomotorius führt die Nervenfasern für den der Accommodation dienenden musculus ciliaris, sowie für den sphincter pupillae und zwar verlaufen diese Fasern in den vordersten Strängen seiner Wurzeln. Ihre nächste centrale Ursprungsstelle scheinen nach Versuchen von Hensen und Völkers[2] diese Fasern im hinteren Theile des Bodens

1 Olbers, De mutationibus oculi internis. Diss. inaug. Göttingen 1780.
2 Hensen und Völkers, Arch. f. Ophthalmologie. XXIV. 1. Abth.

Bayerische Staatsbibliothek München

vom 3. Hirnventrikel zu haben. Reizt man nämlich den vorderen Abschnitt dieses Theils, so erfolgt Accommodation. Reizung etwas weiter hinten hat Verengerung der Pupille zur Folge. Geschieht die Reizung noch weiter hinten, wo der 3. Ventrikel in die Sylvische Wasserleitung übergeht, so zieht sich der rectus intenrus zusammen. Geht man mit dem Reize noch weiter nach hinten, so folgen der Reihe nach Contraktionen des rectus superior levator palpebrae, rectus inferior und endlich obliquus inferior. Dem sphincter pupillae sollen nach der Ansicht einiger Forscher[1] auch noch motorische Fasern in der Bahn des I. trigemini zugeführt werden.

Der dilatator pupillae erhält, wie schon seit langer Zeit bekannt ist, seine Innervation auf ganz anderen Bahnen nämlich durch Sympathicuszweige aus dem Halsmarke, welche sich den Aesten der Carotis anschliessen. Nach HENSEN und VÖLKERS sollen die pupillenerweiternden Fasern des Sympathicus nicht alle das ganglion ciliare durchsetzen, da nach Abtragung desselben Reizung des Sympathicus am Halse immer noch Erweiterung der Pupille hervorbringe.

Im Laufe des normalen Lebens wird, wie von Alters her bekannt, der Pupillenverengerer nicht bloss bei der Accommodation mit Convergenz der Augenaxen erregt, sondern auch reflektorisch durch jeden stärkeren Lichtreiz der die Netzhaut trifft. Die Zweckmässigkeit dieses Reflexmechanismus ist ersichtlich, denn es schützt sich auf diese Weise die Netzhaut so viel als möglich vor allzu starker Reizung, indem das Netzhautbild bei gleicher Helligkeit des Objektes um so dunkler ist je enger die Pupille. Die Pupillenverengerung ist um so bedeutender je grösser die gesammte ins Auge fallende Lichtmenge ist, wächst also sowohl mit der Helligkeit des Objektes als mit der Grösse seines Netzhautbildes. Ferner wirkt Licht, das die Polargegend der Netzhaut beleuchtet, stärker pupillenverengend als solches, das auf die Seitentheile fällt. Lichtreiz, der nur auf eine Netzhaut wirkt, bringt Pupillenverengerung in beiden Augen hervor und zwar in gleichem Maasse.

Wird der oculomotorius und der sympathicus gleichzeitig künstlich (elektrisch) gereizt, so überwiegt in der Iris die Wirkung des ersteren, indem Pupillenverengerung eintritt. Gegen natürliche reflektorische Reizung des Oculomotorius durch starke Belichtung der Netzhaut kann aber künstliche starke Reizung des Sympathicus aufkommen und eine Erweiterung der Pupille hervorbringen. Starke directe

1 GRÄFE, Arch. f. Ophthalmologie II. 2. Abth. S. 302.

elektrische Reizung der ganzen Iris bringt eine mittlere Weite der Pupille zu Stande.[1]

Bemerkenswerth sind endlich die Beziehungen einiger Gifte zu der Innervation der Iris. Die sogenannten Mydriatica besonders Atropin und Hyoscyamin bewirken in die Säftemasse gebracht oder ins Auge geträufelt sehr andauernde Erweiterung der Pupille. Umgekehrt giebt es Gifte namentlich das Physostigmin, welche ebenso angewandt andauernde Verengerung bewirken und deshalb als „Myotica“ bezeichnet werden.

SECHSTES CAPITEL.

Abweichungen des wirklichen Auges vom idealen.

I. Farbenabweichung des Auges.

In allen bisherigen Betrachtungen wurde jedem brechenden Medium des Auges ein bestimmter Brechungsindex beigelegt. Dies ist aber streng genommen nicht zulässig, wenn es sich um das Sehen der uns umgebenden Objekte in natürlicher Beleuchtung durch Sonnenlicht oder auch in künstlicher Beleuchtung durch gewöhnliches Lampenlicht handelt. Es gehen alsdann bekanntlich von jedem Punkte der Oberfläche eines Körpers im Allgemeinen verschiedene — meist unzählige — Strahlenarten aus, die sich durch ihre Schwingungsdauer unterscheiden und die, wie später gezeigt werden wird, auf die Netzhaut verschiedenartige Eindrücke machen. Strahlen von verschiedener Schwingungsdauer kommen aber bekanntlich für dieselbe Zusammenstellung zweier brechender Medien im Allgemeinen verschiedene Brechungsindices zu, und zwar ist in der Regel der Brechungsindex um so grösser, je kleiner die Schwingungsdauer ist.

Sendet also ein Objektpunkt gleichzeitig Strahlenbündel von verschiedener Schwingungsdauer aus, so muss eine brechende Kugelfläche von demselben ebenso viele Bilder hintereinander liefern als Strahlenarten vorhanden sind, indem sich das gebrochene Strahlenbündel der geringsten Schwingungsdauer zuerst vereinigt, da seine Strahlen am stärksten abgelenkt werden und dann erst nach der Reihe die übrigen. Dasselbe

1 Engelhardt, Beiträge zur Lehre von den Bewegungen der Iris. In den Untersuchungen aus dem Würzburger Laborat. 4. Heft. herausgeg. von R. Gscheidlen.

muss stattfinden, wenn mehrere Brechungen an hintereinander liegenden Kugelflächen erfolgen, wenigstens sicher dann, wenn alle Brechungen im selben Sinne erfolgen, d. h. wenn die Knickungswinkel der Strahlen alle nach derselben Seite hohl sind, denn alsdann müssen zwei ursprünglich in derselben Richtung fortgepflanzte Strahlen von verschiedener Brechbarkeit bei jeder Brechung weiter auseinandertreten. Dies ist aber beim Auge im Allgemeinen der Fall. Es müssen also jedesfalls im Auge von ein und demselben Objektpunkte, wenn er verschiedene Lichtarten gleichzeitig aussendet, verschiedene Bilder hintereinander entstehen. Wenn also der die Strahlen von 450 Billionen Schwingungen in der Sekunde vereinigende Bildpunkt für einen gegebenen Objektpunkt in die Netzhaut fällt, so liegt der Bildpunkt sicher vor der Netzhaut, in welchem sich die Strahlen von 750 Billionen Schwingungen in der Sekunde vereinigen, die von demselben Objektpunkte ausgegangen sind, und es werden also diese Strahlen auf der Netzhaut in einen Zerstreuungskreis ausgebreitet sein.

Es scheint hiernach als wäre ein deutliches Sehen bei nicht homogener Beleuchtung unmöglich. Gleichwohl bemerkt man beim gewöhnlichen Sehakt auch in Beleuchtung mit gemischtem Lichte nichts von einer auf Farbenzerstreuung beruhenden Undeutlichkeit. Dies hat in verschiedenen Umständen seinen Grund. Erstens nämlich ist für die brechenden Medien des Auges, wie für alle wässrigen Lösungen der Unterschied der Brechungsindices der Strahlen verschiedener Schwingungsdauer nicht sehr gross, so dass die Vereinigungspunkte der verschiedenfarbigen Strahlen nur wenig hintereinander liegen, um so weniger als die Vereinigungsweiten im Auge überhaupt kurz sind. Die durch Farbenzerstreuung bedingten Zerstreuungskreise werden also überall sehr klein sein. Nimmt man z. B. für das brechende Medium des oben beschriebenen reducirten Auges dieselbe Dispersion an wie für das Wasser, so hätte man für das rothe Licht der Fraunhofer'schen Linie C den Brechungsindex 1,33 und für das violette Licht der Linie G den Brechungsindex 1,34 zu setzen. Die Brennweiten wären dann für rothes Licht 20,57, für violettes 20,14 mm. Wenn nun die Netzhaut mit der Brennweite für rothe Strahlen zusammenfiele, so würde der Zerstreuungskreis für die violetten bei einem Pupillendurchmesser von 4 mm. etwa 0,08 mm. Durchmesser haben, was allerdings schon eine in Betracht kommende, aber doch immerhin sehr kleine Grösse wäre. In Wirklichkeit scheint sogar die resultirende Farbenzerstreuung noch etwas grösser zu sein als die für das reducirte Auge soeben berechnete. Diese nämlich ergiebt, dass, wenn das Auge in monochromatischer rother Beleuchtung em-

metropisch angenommen wird, es in monochromatischer violetter Beleuchtung für 713 mm. oder 26 Zoll eingerichtet wäre. FRAUNHOFER hatte aber gefunden, dass sein eigenes bei rother Beleuchtung emmetropisches Auge in violetter Beleuchtung für nur 18 bis 24 Zoll eingerichtet war. Ebenso fanden HELMHOLTZ und MATTHIESSEN den Unterschied der Sehweite für rothes und violettes Licht etwas freilich nur wenig grösser, als es den obigen Annahmen für das reducirte Auge entspricht. Trotzdem stört wie gesagt die chromatische Abweichung den gewöhnlichen Sehakt niemals in merklichem Grade. Dazu trägt besonders folgender Umstand bei. Beim gewöhnlichen Sehakt wirkt in der Regel Licht, in dem die Strahlen von kleinster und grösster Brechbarkeit nur in geringer Intensität physiologisch wirken, so dass wenn die Retina sich in der Vereinigungsweite der Strahlen von mittlerer Brechbarkeit befindet, die Zerstreuungskreise, welche alsdann schon geometrisch noch kleiner sind als vorhin berechnet wurde, auch so schwach beleuchtet sind, dass ihre Helligkeit gegenüber der Helligkeit des Centrums geradezu verschwindet. Man sieht leicht, dass auch abgesehen von der geringen Intensität der äussersten rothen und violetten Strahlen ein Zerstreuungsbild der in Rede stehenden Art in der Mitte am hellsten sein muss, da sie von Strahlen aller Brechbarkeitsstufen beleuchtet ist, während jede folgende concentrische Zone von weniger Strahlen getroffen wird als die nächst vorhergehende von ihr umschlossene.

Betrachtet man eine weisse Fläche auf dunklem Grunde und nimmt man das Auge für Strahlenbündel mittlerer Brechbarkeit, welche von Punkten dieser Fläche ausgehen, eingerichtet an, so kann man berechnen, wie die Helligkeit am Rande des Netzhautbildes abnimmt.

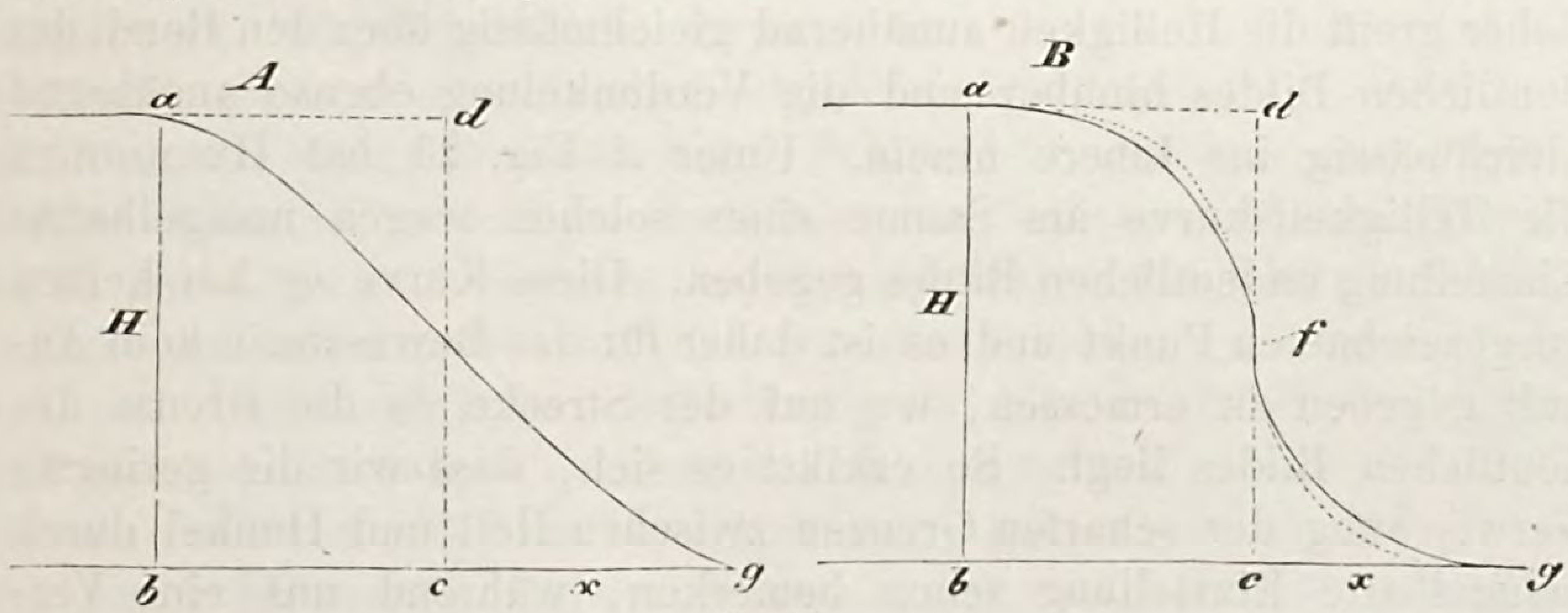


Fig. 23.

HELMHOLTZ stellt das Ergebniss dieser Rechnung durch die Curve *afg* unter *B* Fig. 23 dar. Als Abscissenaxe ist eine Linie gedacht, welche den Rand des Bildes senkrecht durchschneidet und der Punkt *c*

bedeutet den Durchschnittspunkt derselben mit der Randlinie, welche gelten würde, wenn nur Strahlen von mittlerer Brechbarkeit vorhanden wären und mithin ein geometrisch scharfes Bild entstände. Wegen der chromatischen Zerstreuungskreise greift nun die Helligkeit ein wenig nach aussen (bei *g*) über diesen Rand hinüber und ein wenig nach innen erstreckt sich die Verminderung der vollen Helligkeit, welche erst von *b* an nach links im Inneren des Bildes statthat. Die Helligkeit in jedem Punkte ist durch die daselbst zu errichtende Ordinate der Curve *afg* dargestellt; *ba* ist mithin das Maass der vollen Helligkeit, welche von *b* nach links konstant bleibt. Der Gang der Curve zeigt einen senkrechten Abfall (bei *f*) also eine plötzliche Verminderung der Helligkeit in dem Punkte *c*, welcher dem Rande des absolut deutlichen Bildes entspricht. Dieser plötzliche Abfall der Helligkeit muss sich aber dem Bewusstsein als eine scharfe Grenze bemerklich machen, so dass ein solches Bild für das Sehen denselben Dienst leistet wie ein vollkommenes, dessen Helligkeitskurve durch die geknickte Linie *adcg* darzustellen wäre. Es ist noch zu bemerken, dass die Kurve *afg* von Helmholtz konstruirt ist ohne Rücksicht auf den Umstand, dass die Strahlen von grösster und von kleinster Brechbarkeit im Spektrum des weissen Lichtes von weit geringerer Wirkung sind. Wenn man hierauf Rücksicht nimmt, so nähert sich die Kurve der geknickten Linie *adcg* noch mehr, in dem sie etwa wie die punktirte Linie verliefe.

Ganz anders verläuft die Helligkeitskurve auf einer den Rand des Bildes durchsetzenden Linie, wenn Zerstreuungskreise in Folge unvollkommener Anpassung vorhanden sind. Jeder solche einzeln betrachtet, ist gleichmässig hell in seiner ganzen Ausdehnung und daher greift die Helligkeit annähernd gleichmässig über den Rand des deutlichen Bildes hinüber und die Verdunkelung ebenso annähernd gleichmässig ins Innere hinein. Unter *A* Fig. 23 hat Helmholtz die Helligkeitskurve am Saume eines solchen wegen mangelhafter Einstellung undeutlichen Bildes gegeben. Diese Kurve *ag* hat keinen ausgezeichneten Punkt und es ist daher für das Bewusstsein kein Anhalt gegeben zu ermessen, wo auf der Strecke *bg* die Grenze des deutlichen Bildes liegt. So erklärt es sich, dass wir die geringste Verwischung der scharfen Grenzen zwischen Hell und Dunkel durch mangelhafte Einstellung schon bemerken, während uns eine Verwischung durch Farbenzerstreuung vollständig entgeht.

Um die unzweifelhaft vorhandene Farbenzerstreuung wirklich am eigenen Auge zu bemerken, muss man daher besondere Veranstaltungen treffen. Eine solche besteht darin, dass man seine Seh-

weite nacheinander in verschiedener monochromatischer Beleuchtung bestimmt. Man findet sie, wie oben schon erwähnt wurde, stets in rother Beleuchtung beträchtlich grösser als in violetter. Da man hier aber immer noch den freilich nur spitzfindigen Einwand erheben könnte, es handle sich um unwillkürliche Akkommodationsvorgänge, so ist es lehrreich noch einige Thatsachen kennen zu lernen, bei denen wirklich farbige Säume entstehen, wie an den Bildern mangelhaft achromatisirter Fernröhre. Die einfachste derartige Thatsache kann man jeden Augenblick in folgender Art beobachten. Man betrachte eine Grenze zwischen einer weissen und schwarzen Fläche mit vollkommener Anpassung. Man wird keinen farbigen Saum bemerken. Sowie man aber jetzt einen grossen Theil der Pupille mit einem Schirm verdeckt, dessen Kante parallel ist der Grenze zwischen hell und dunkel im Objekte, so erscheint jene Grenze gelb gesäumt, wenn der Theil der Pupille verdeckt ist, welcher nach der Seite des Schwarz im Objekte liegt und sie erscheint blau gesäumt im entgegengesetzten Falle. Die Erklärung ist sehr einfach. Sei in Fig. 24 A ein weiss leuchtender Punkt,

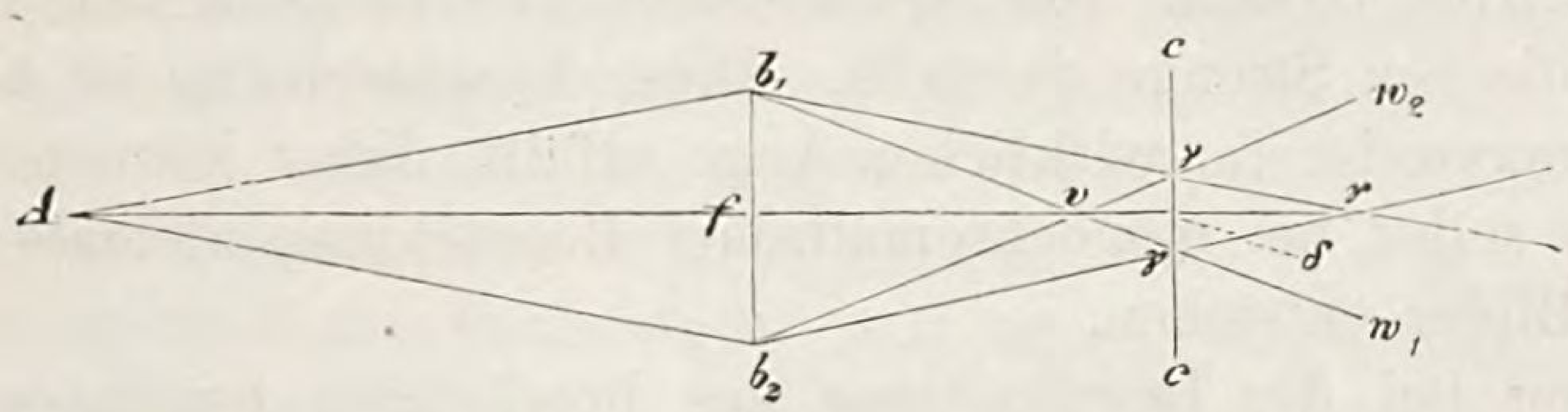


Fig. 24.

b_1 b_2 sei die Pupille, das violette von A ausgehende Strahlenbündel vereinige sich in v, das rothe in r. Die Netzhaut befinde sich bei cc, so dass in ihr das Bündel von Strahlen mittlerer Brechbarkeit vereinigt wird. Der sehr kleine Zerstreuungskreis $\gamma\gamma$ wird überall von gemischtem Lichte getroffen werden, also nicht merklich gefärbt erscheinen. Schiebt man aber einen Schirm vor, der z. B. die untere Hälfte des Strahlenbündels fb_2 abhält, so kommen auf den oberen Theil des Zerstreuungskreises nur noch Strahlen von kleiner Brechbarkeit und auf den unteren Theil nur noch solche von grosser Brechbarkeit. Daher wird nach aussen projicirt der Punkt A oben blau und unten gelb und roth aussehen. Ist A ein Punkt der wagrechten Grenze zwischen einer oben gelegenen weissen und unten gelegenen schwarzen Fläche, so schieben sich nur die oberen Säume der Zerstreuungskreise über die andern hervor und die Grenze erscheint gelb oder röthlich gesäumt. Ist umgekehrt A ein Punkt der wagrechten Grenze zwischen unten weiss und oben schwarz, so schieben sich nur die unteren blauen Theile der Zerstreuungskreise über das ganz weisse

Feld hervor und bilden einen blauen Saum wie es dem obigen Satze entspricht.

Alle Erscheinungen der Farbenzerstreuung treten subjektiv weit stärker hervor, wenn man nicht weisse Beleuchtung anwendet, sondern solche, in welcher zwei Lichtarten von möglichst verschiedener Brechbarkeit vorherrschen. Solches Licht erhält man z. B. wenn man Sonnen- oder Lampenlicht durch Kobaltglas gehen lässt. Das durchgelassene Licht enthält nämlich vorwiegend rothe und blaue Strahlen und nur sehr wenig von mittlerer Brechbarkeit. Wenn man solches Licht anwendet, erscheint schon ohne Verdeckung eines Theiles der Pupille ein hellleuchtender Punkt entweder mit einem blauen oder rothen Hofe, je nachdem das Auge für blaue oder für rothe Strahlen eingerichtet ist.

II. Astigmatismus.

Bisher haben wir immer ein ideales Auge vorausgesetzt, welches ein centrirtes System von sphärischen Trennungsflächen in aller mathematischen Strenge darstellt. Diese Voraussetzung ist aber nur annäherungsweise im wirklichen Auge erfüllt, daher können auf der Netzhaut selbst bei monochromatischer Beleuchtung niemals absolut scharfe Bilder entstehen.

Schon bei der Beschreibung des brechenden Systemes wurde erwähnt, dass die vordere Hornhautfläche nicht genau einen Kugelabschnitt darstellt, dass sich ihr wagrechter Meridian vielmehr eher einer Ellipse, als einem Kreise anschliesst. Diese Abweichung bringt aber keine Ungenauigkeit der Bilder hervor, vielmehr trägt sie zur Erhöhung der Deutlichkeit bei, da an einer Kugelfläche die Randstrahlen eines homocentrischen Bündels verhältnissmässig zu stark gebrochen werden und dieser Fehler also durch die schwächere Krümmung der Hornhaut am Rande verbessert wird. Ueberhaupt kann aber dieser Umstand für das direkte Sehen nur bei ausnahmsweise weiter Pupille zur Sprache kommen.

Es wurde ferner bei der Beschreibung der brechenden Flächen noch einer andern Abweichung gedacht, nämlich der unvollkommenen Centrirung, d. h. es wurde gezeigt, dass die Mittelpunkte der drei Haupttrennungsflächen nicht genau auf einer geraden Linie liegen. Hierdurch muss nothwendig eine gewisse Asymmetrie in die Brechung jedes Strahlenbündels gebracht werden, so dass seine Strahlen nicht mehr genau gleichmässig um den mittleren herum vertheilt bleiben können, selbst wenn dieser mittlere Strahl die Axe selbst

wäre. Eine ähnliche Asymmetrie wird hervorgebracht durch eine andere Abweichung der Trennungsflächen, welche bei der Beschreibung derselben einstweilen unberücksichtigt geblieben ist. Durch genaue ophthalmometrische Messung der Reflexbilder in verschiedenen Meridianebenen kann man nämlich direkt nachweisen, dass die Krümmung der verschiedenen Hornhautmeridiane selbst am Scheitel verschieden ist. Es ist hierbei vor Allem der folgende allgemeine geometrische Satz zu beachten: wenn man in einem Punkt einer irgendwie gestalteten krummen Fläche die Normale errichtet und durch dieselbe ein Büschel von Ebenen legt, so stehen allemal die beiden dieser Ebenen aufeinander senkrecht, in welche die Schnittkurven fallen, welche in dem gedachten Punkte die grösste und die kleinste Krümmung haben. Wenden wir dies auf den Scheitel der Hornhaut an, so ergiebt sich, dass, wofern überall die verschiedenen Meridiane verschiedene Krümmung besitzen, der Meridian grösster und der Meridian schwächster Krümmung jedesfalls aufeinander senkrecht stehen.

Um anschaulich zu machen, wie gross die Verschiedenheiten der Krümmung am Hornhautscheitel in verschiedenen Meridianen bei normalen Augen zu sein pflegen, sind in der Tabelle (S. 106) einige Resultate ophthalmometrischer Messung zusammengestellt.

In der ersten Spalte bedeutet der Buchstabe *m* männliches, *w* weibliches Geschlecht und die Zahl das Alter in Jahren. In der zweiten Spalte bedeutet *E* Emmetropie, *M* Myopie, *H* Hypermetropie und der dabei stehende Bruch den Grad derselben. In den nun folgenden 12 Spalten sind die Krümmungsradien am Scheitel der vorderen Hornhautfläche in 12 Meridianebenen in Millimetern eingeschrieben. Der Meridian ist durch den in der Ueberschrift der Spalte bezeichneten Winkel mit dem horizontalen Meridian bestimmt, so dass die mit 0° überschriebene Spalte die Halbmesser der horizontalen, die mit 90° überschriebene die Halbmesser der vertikalen Meridiane enthält. Im dritten Theil der nun folgenden Spalte ist der Winkel angegeben, welchen der Meridian grösster Krümmung (welche dem kleinsten Krümmungshalbmesser entspricht) mit dem horizontalen Meridian einschliesst. Die Strichelchen in den beiden ersten Abtheilungen dieser Spalte sollen ungefähr eine Idee von der Lage des Meridians grösster Krümmung geben und zugleich andeuten, ob sich die Messung auf ein rechtes oder linkes Auge bezieht. Ist der Strich in der ersten Abtheilung, so bezieht er sich auf ein rechtes Auge und umgekehrt. Die Senkrechte zwischen den beiden Abtheilungen kann so angesehen werden als bedeute sie die Medianebene des Gesichtes, dessen Antlitz-

Geschlecht u. Alter.	Refraktionszustand.	Krümmungshalbmesser am Scheitel der Hornhaut in mm. in den verschiedenen Meridianen.												Lage des Hornhautmeridianes grösster Krümmung.	Lage des Meridianes grösster Krümmung im reducirten Auge.	Grad des Astigmatismus des gesammten Auges.	Beobachter.
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°				
m 24	M $^1/_{50}$	7,94	7,96	7,84	7,66	7,70	7,73	7,71	7,90	7,86	7,82	7,85	7,88	\| 90°	\ 72°	As = $^1/_{92}$	Stamer.
m 25	E	8,22	8,02	7,99	7,96	7,98	8,11	8,05	8,09	8,09	8,22	8,24	8.31	/ 45°	\| 92$^1/_2$°	As = $^1/_{92}$	Middelburg.
m 25	M $^1/_{80}$	8,14	8,17	8,16	8,13	8,22	8,09	8,06	8,07	8,01	7,98	8,08	8,13	/ 135°	\ 87$^1/_2$°	As = $^1/_{55}$	Middelburg.
m 36	E	8,13	8,33	8,39	8,35	8,25	8,14	8,02	8,07	8,01	8,09	8,03	8,14	\ 120°	/ 62°	As $\leqq$ $^1/_{100}$	Middelburg.
m 36	E	8,47	8,41	8,36	8,35	8,33	8,24	8,18	8,14	8,13	8,09	8,15	8,23	/ 120°	/ 97°	As $\leqq$ $^1/_{100}$	Middelburg.
m 16	E	7,93	7,88	7,62	7,56	7,63	7,63	7,85	7,76	7,84	7,96	7,88	7,98	/ 55°	\ 95°	As $\leqq$ $^1/_{100}$	Middelburg.
m 16	H $^1/_{80}$	7,92	7,91	7,87	7,85	7,78	7,62	7,68	7,62	7.53	7,48	7,63	7,68	/ 120°	\| 90°	As $\leqq$ $^1/_{100}$	Middelburg.
w 18	E	8,06	7,83	7,82	7,80	7,82	7,85	7,89	7,99	7,91	8,11	8,00	7,11	/ 45°	— 2°		Middelburg.

fläche man wie die Tabelle vor sich hätte. Die beiden folgenden Spalten enthalten Grössen, welche erst im Folgenden zu behandeln sind.

Geht man die 12 Krümmungshalbmesser derselben Hornhaut der Reihe nach durch, so sieht man den Werth allmählich zu- und wieder abnehmen und im allgemeinen liegen die Meridiane des maximalen und minimalen Werthes um 90° auseinander, wie der oben angezogene Satz erfordert. Es fehlt übrigens nicht an kleinen Abweichungen von der Regelmässigkeit des Wachsens und Abnehmens, wie das bei so schwierigen Messungen kaum anders zu erwarten ist.

Fällt auf eine brechende Fläche von solcher Beschaffenheit ein Strahlenbündel von kleiner Basis, so kann natürlich eine punktuelle Vereinigung des gebrochenen Bündels nicht stattfinden, selbst wenn das Bündel nahezu normal auffällt, d. h. selbst wenn alle Strahlen des Bündels nur sehr kleine Winkel mit den entsprechenden Einfallslothen bilden. Denn nennen wir r_1 den grössten und r_2 den kleinsten Krümmungshalbmesser am Scheitel der Fläche, sowie n den Brechungsindex und denken wir uns das Bündel von einem in der Entfernung p gelegenen Punkte ausgegangen, so werden die Strahlen des Bündels, welche auf den Meridian schwächster Krümmung fallen, in einer Entfernung

$$= \frac{np \,.\, r_1}{p\,(n-1) - r_1}$$

vereinigt werden, so als ob sie auf eine Kugelfläche mit dem Radius r_1 gefallen wären, und die Strahlen, welche auf den Meridian stärkster Krümmung treffen, vereinigen sich in einem Abstande

$$= \frac{npr_2}{p\,(n-1) - r_2}$$

der offenbar kleiner ist als jener. Es lässt sich nun zeigen, dass die übrigen Strahlen des Bündels in der letzteren Entfernung sämmtlich durch ein kleine begrenzte Gerade hindurchgehen, die im Vereinigungspunkte der stärkstgebrochenen Strahlen auf dem mittleren Strahle senkrecht steht und in der Ebene des Meridianes schwächster Krümmung liegt; und dass in der Vereinigungsweite der schwächst gebrochenen Strahlen die sämmtlichen übrigen Strahlen durch die Punkte einer kleinen begrenzten Geraden gehen, welche im Vereinigungspunkte der schwächst gebrochenen Strahlen auf dem mittleren Strahle senkrecht steht und in der Ebene des Meridianes stärkster Krümmung liegt. Die Begrenzung der erstgedachten Vereinigungslinie sämmtlicher Strahlen des Bündels — oder der „vorderen Brennlinie“ — wird gebildet durch die beiden äussersten Strahlen des

schwächst gebrochenen Büschels [1], die von allen Strahlen des Bündels hier noch am weitesten von einander abstehen. Aehnlich wird die Begrenzung der zweiten Vereinigungslinie sämmtlicher Strahlen des Bündels oder die „hintere Brennlinie“ gebildet durch die beiden äussersten Strahlen des stärkst gebrochenen Büschels, welche hier von allen Strahlen schon wieder am weitesten auseinander getreten sind. Die Gestalt des ganzen gebrochenen Bündels wird also ganz dieselbe sein wie die schon früher beschriebene, welche entsteht durch Brechung eines dünnen Strahlenbündels an einer Kugelfläche, wenn es sehr schräg auf dieselbe fällt.

In Fig. 25 sind vier Randstrahlen des stärkst und des schwächst gebrochenen Büschels und der mittlere Strahl perspektivisch ge-

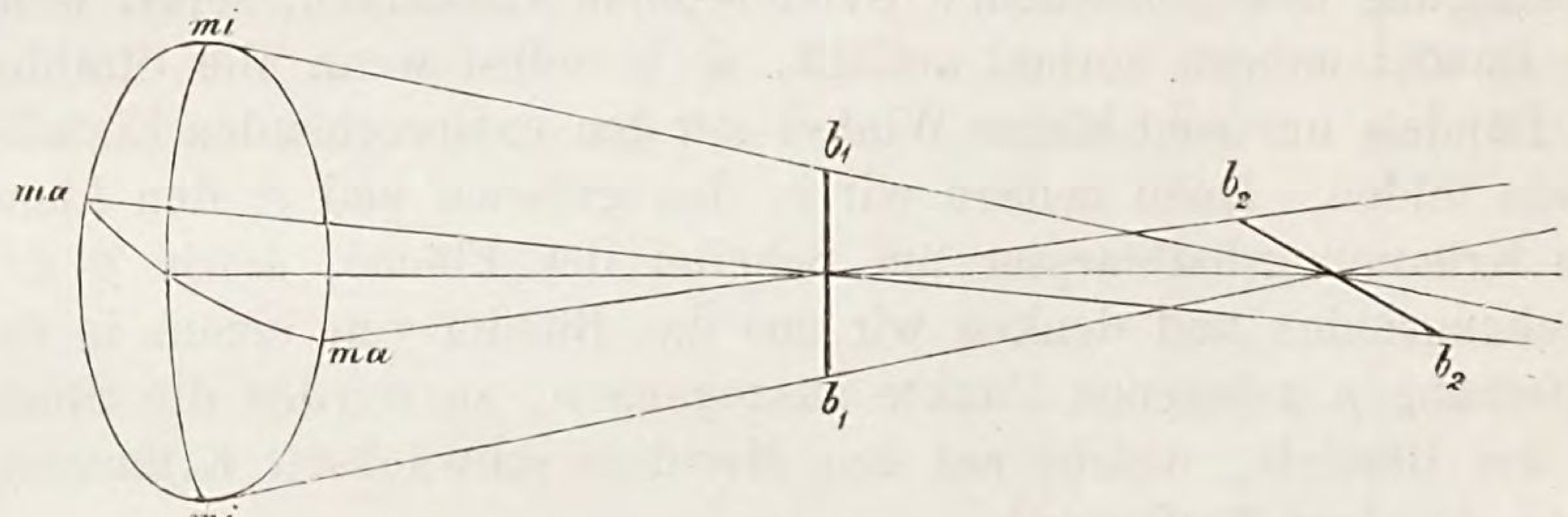


Fig. 25.

zeichnet. Es sei der senkrechte Meridian *mi mi* der Meridian schwächster Krümmung oder von grösstem Halbmesser und der wagrechte *ma ma* der Meridian stärkster Krümmung, dann wird das ganze Strahlenbündel zuerst auf der senkrechten begrenzten Brennlinie $b_1 b_1$ und hernach auf der wagrechten begrenzten Brennlinie $b_2 b_2$ vereinigt sein. Die zwischen den beiden Brennlinien eingeschlossene Strecke des Centralstrahles heisst „Brennstrecke“. Man kann diese Gestalt des Strahlenbündels anschaulich machen, indem man eine parallelepipedische Wassermasse vorn begrenzt durch ein uhrglasartiges Stück, dessen Krümmung in den verschiedenen Meridianen verschieden ist. Ein solches erhält man leicht durch Aussprengen aus einem Flaschenbauch. Lässt man auf die Vorderfläche dieses Glasstückes (das als die vordere Begrenzung der Wassermasse selbst gelten kann) von einem hellleuchtenden Punkte ein homocentrisches Strahlenbündel fallen, so kann man die Durchschnittsfigur des gebrochenen Strahlenbündels sichtbar machen auf einem in die Wassermasse eingesetzten matten Glasschirm. Ist wie oben an-

1 Bezüglich der Bedeutung des Wortes Büschel im Unterschiede von Bündel siehe Seite 77, Anm.

genommen wurde der senkrechte Meridian der Trennungsfläche in Wirklichkeit am schwächsten gekrümmt, so giebt es eine Stellung des Schirmes, in der auf ihm ein kleiner senkrechter Strich beleuchtet erscheint und eine zweite Stellung in etwas grösserer Entfernung von der Trennungsfläche, wo ein kleiner wagrechter Strich auf dem Schirm beleuchtet ist. Wenn nun der durchsichtige Theil der Trennungsfläche, so genau als es die Krümmung zulässt, kreisförmig begrenzt ist, so erscheint in jeder anderen Stellung des Schirmes auf demselben eine elliptische Lichtfigur, deren grosse Axe senkrecht steht, wenn der Schirm eine Stellung zwischen der Trennungsfläche und der ersten Brennlinie einnimmt. Steht dagegen der Schirm weiter als die 2te Brennlinie von der Trennungsfläche ab, so liegt die grosse Axe der Ellipse wagrecht. Zwischen den Brennlinien giebt es eine Lage des Schirmes, wo der beleuchtete Fleck kreisförmig begrenzt ist. In Fig. 26 ist eine Reihe der aufeinander folgenden Durchschnittsfiguren

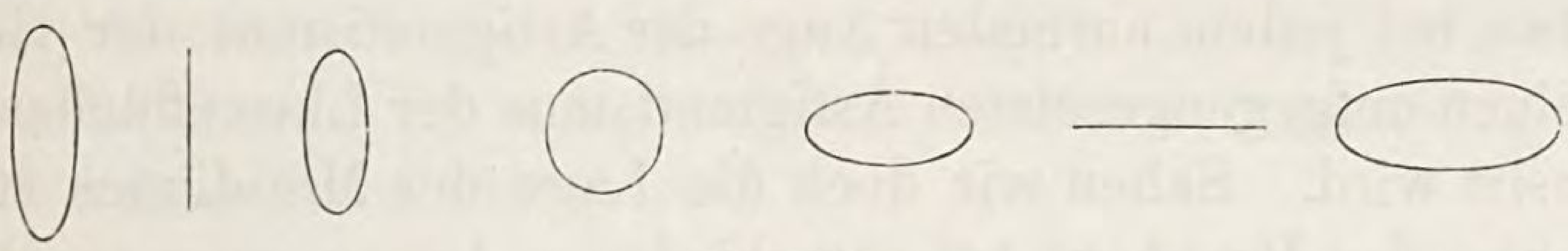


Fig. 26.

des Strahlenbündels gezeichnet. Wenn ein dünnes, ursprünglich homocentrisches Strahlenbündel durch mehrere hintereinander liegende Trennungsflächen hindurchgeht, von denen eine oder auch mehrere nicht genau drehrund ist, oder von denen eine oder mehrere nicht sehr annähernd normal vom mittleren Strahle des Bündels getroffen werden, so hat das Bündel nach der letzten Brechung stets die soeben beschriebene Gestalt, d. h. an zwei Stellen ist es auf eine kleine gerade Linie concentrirt und die Richtungen dieser beiden Linien, der Brennlinien überkreuzen einander senkrecht. Die Abweichung der Gestalt des gebrochenen Bündels von der eines homocentrischen braucht aber, nachdem sie an einer Fläche entstanden ist, nicht nothwendig durch die folgenden Brechungen vergrössert zu werden. Im Gegentheil ist es denkbar, dass sie bei einer folgenden wieder verkleinert wird, wenn nämlich an der betreffenden Fläche die grösste Krümmung in die Ebene fällt, in welche an der vorhergehenden Fläche die kleinste Krümmung fiel. Es ist sogar der Fall an sich denkbar, dass die durch eine Brechung erzeugte Abweichung durch eine folgende vollständig aufgehoben und das resultirende Strahlenbündel genau homocentrisch wird. Denkt man sich aber die Orientirung der Flächen um die Axe herum rein zufällig, so hat dieser Fall natürlich eine

unendlich kleine Wahrscheinlichkeit und es werden im Allgemeinen die Ebenen der stärksten Krümmung bei den verschiedenen Flächen weder zusammenfallen, noch aufeinander senkrecht stehen, sondern beliebige schiefe Winkel miteinander bilden. In einem solchen Falle wird die Lage der vorderen Brennlinie mit keiner der Ebenen schwächster Krümmung genau zusammenfallen, sondern eine mittlere Lage einnehmen, die von der Orientirung der Flächen und von den Unterschieden ihrer Krümmungshalbmesser abhängt in einer Weise, die hier nicht eingehend zu erörtern ist.

Da an einer Fläche des Auges, nämlich an der vorderen Hornhautfläche eine verschiedene Krümmung in verschiedenen Meridianen als normale Bildung nachgewiesen ist, so haben wir nach den vorstehenden Erörterungen zu erwarten, dass die Strahlenbündel im Glaskörper, die soeben beschriebene Abweichung von der Homocentricität zeigen, welche als „Astigmatismus“ bezeichnet wird. In der That ist es ja, wie schon bemerkt wurde, sehr unwahrscheinlich, dass [etwa bei jedem normalen Auge der Astigmatismus der Hornhaut durch einen entgegengesetzten Astigmatismus der Linsenflächen genau compensirt wird. Sahen wir doch die Lage des Meridianes stärkster Krümmung der Hornhaut bei verschiedenen Augen ganz regellos variiren. Wie sollte da der compensirende Astigmatismus der Linse diesen regellosen Variationen in jedem Individuum genau folgen?

Man könnte jetzt verlangen, dass die Abweichungen der Linsenflächen von der Kugelgestalt oder von der genauen Centrirung ähnlich wie die der Hornhaut objektiv durch Messung der Reflexbilder bestimmt würden und dass dann der resultirende Astigmatismus des Auges berechnet würde. Die Lösung dieser Aufgabe ist indessen wohl fürs erste unmöglich. Man muss sich daher darauf beschränken, durch subjektive Prüfungen über den resultirenden Astigmatismus eines Auges sich Kenntniss zu verschaffen. Jedesfalls ist derselbe übrigens bei normalen Augen so gering, dass er sich beim Sehen der alltäglichen Objekte nicht störend bemerklich macht. Beim Betrachten gewisser Objekte kann man sich aber leicht überzeugen, dass fast jedes Auge mit einem mehr oder weniger hohen Grade von Astigmatismus behaftet ist. Das geeignetste Objekt zu diesem Zwecke bildet ein sternförmiges System feiner schwarzer Striche auf hellem Grunde wie Fig. 27. Stellt man ein solches dem Auge gegenüber in die Ferngrenze des Sehens (ein emmetropisches oder hypermetropisches Auge wäre dabei mit einer Sammellinse zu bewaffnen), so wird man selten auf ein Auge treffen, welches alle Striche gleich deutlich sieht, wenn es den Kreuzungspunkt derselben fixirt.

In weitaus den meisten Fällen wird der Geprüfte angeben, dass er eine (oder zwei benachbarte) am deutlichsten oder am „schwärzesten“ sieht, die übrigen aber so als wären sie schwächer gezogen. Die schärfst gesehene Linie ist bei dem einen Menschen die wagrechte, bei einem andern die senkrechte, bei wieder andern diese oder jene von den schrägen. Die Richtung der schärfst gesehenen Linie bezeichnet nun für das Auge die Meridianebene, welcher die hinteren Brennlinien der im Glaskörper fortgepflanzten Strahlenbündel parallel sind. Man kann dies auch so ausdrücken: Sollte die optische Wirkung des Auges durch eine einzige Trennungsfläche so annähernd als möglich ausgeübt werden, so müsste man dieser eine Abweichung von der Kugelgestalt in dem Sinne beilegen, dass die Meridianebene stärkster Krümmung den deutlichst gesehenen Strich enthält. Ist nämlich das Objekt an der Ferngrenze des Sehens, so dass jede weitere Entfernung schon eine merkliche Undeutlichkeit hervorbringt, so liegen offenbar die hinteren Brennlinien der einzelnen Strahlenbündel in der Netzhaut, denn wenn die Netzhaut die Strahlenbündel weiter vorn etwa in der vorderen Brennlinie schnitte, so würde ein weiteres Wegrücken des Objektes zunächst noch keine Undeutlichkeit zur Folge haben, da bei diesem Weiterrücken erst noch die übrige Brennstrecke und zuletzt die hintere Brennlinie die Netzhaut durchwandern würde. Das Bild eines schwarzen Striches im Objekte, dessen Richtung der hinteren Brennlinie jedes Strahlenbündels parallel ist, wird aber bei einem noch so hohen Grade des Astigmatismus, wofern derselbe nur ganz regelmässig ist, ganz ebenso deutlich sein, wenn diese hinteren Brennlinien in die Retina fallen, als wenn in derselben eine vollkommen punktuelle Vereinigung der Strahlenbündel stattfände. Von den Brennlinien der Punkte des hellen Grundes ragt ja nichts in den Raum des idealen Bildes des schwarzen Striches hinein. Anders verhält es sich für jeden Strich im Objekte, dessen Richtung eine andere ist. Hier greifen die schräg dazu liegenden Brennlinien von benachbarten Punkten des hellen Grundes in den Raum des idealen

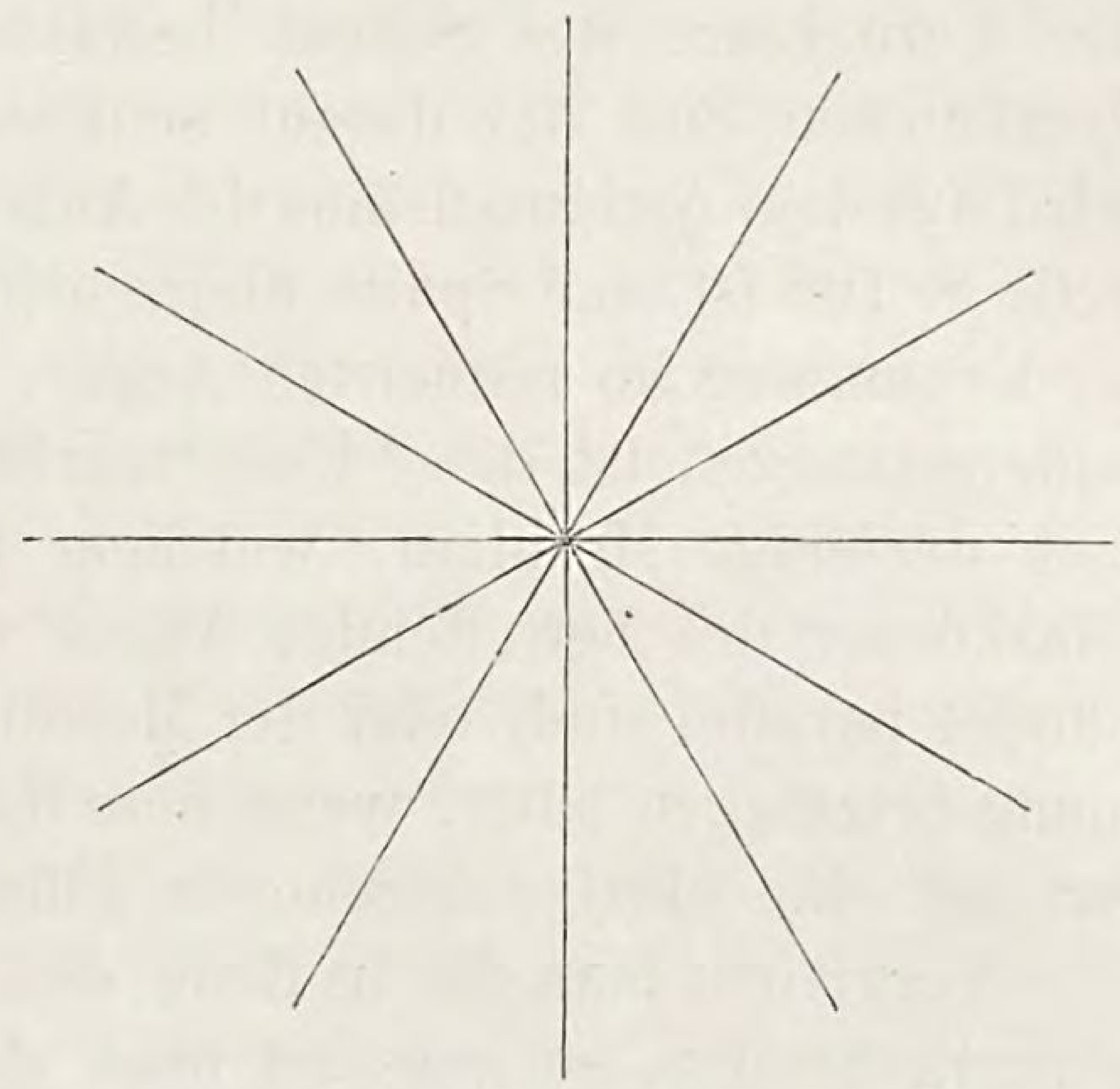


Fig. 27.

Bildes ein und erhellen also mehr oder weniger das Dunkel, welches hier herrschen sollte. Im höchsten Grade wird dies gelten für den Strich, dessen Richtung auf der Richtung der hinteren Brennlinien senkrecht steht. Es wäre somit die Erscheinung, dass in einer an der Ferngrenze des Sehens betrachteten Sternfigur ein Strich am deutlichsten und der darauf senkrechte am undeutlichsten gesehen wird aus dem Astigmatismus des Auges befriedigend erklärt. In der Tabelle S. 106 ist eine Spalte überschrieben „Lage des Meridianes grösster Krümmung im reducirten Auge“. Nach den vorstehenden Auseinandersetzungen ist diese Ueberschrift verständlich. Es ist eben einfach derjenige Meridian, welchem die hinteren Brennlinien der im Glaskörper des betreffenden Auges wirklich fortgepflanzten Strahlenbündel parallel sind, oder der Meridian, dem man die stärkste Krümmung beizulegen hätte, wenn man dasselbe in der S. 64 angegebenen Art auf eine einzige brechende Fläche reducirt.

Vergleicht man die in Rede stehende Spalte der Tabelle mit der vorhergehenden, so gewahrt man, dass die hinteren Brennlinien der im Glaskörper wirklich fortgepflanzten Strahlenbündel nicht parallel sind dem Meridiane stärkster Krümmung der Hornhaut. Dies zeigt, dass der Astigmatismus des Gesammtauges nicht allein abhängt von der Abweichung der vorderen Hornhautfläche von der Kugelgestalt, dass vielmehr auch die Linsenflächen durch Abweichung, sei es von der Centrirung, sei es von der Kugelgestalt Einfluss darauf haben. Durch diesen Einfluss wird natürlich einerseits die Lage der Ebene stärkster Gesammtbrechung mitbestimmt, andererseits kann der Betrag des Gesammtastigmatismus dadurch sowohl grösser als kleiner werden, als der Betrag des Hornhautastigmatismus.

Rückt man jetzt die Sternfigur (die übrigens aus sehr feingezogenen Strichen bestehen muss) an die Nahegrenze des Sehens, so ist bei einem regelmässig gebildeten Auge stets derjenige Strich zuletzt noch deutlich zu sehen, welcher auf dem an der Ferngrenze deutlichst gesehenen senkrecht steht. Dies ist auch von vorn herein zu erwarten, wenigstens unter der Voraussetzung, dass die beim Versuch stattfindende Anpassung den Astigmatismus nicht wesentlich verändert. In der That wird beim Annähern des Objektes die Undeutlichkeit dann anfangen merklich zu werden, wenn die ganze Brennstrecke hinter der Netzhaut liegt.[1] Wenn also gerade noch die vorderen Brennlinien der Strahlenbündel mit der Netzhaut

1 Für einen Beobachter, der bei Annäherung des Objektes den ursprünglichen Refraktionszustand aufrecht erhalten kann, ist es nicht erforderlich das Objekt bis an die Nahegrenze des Sehens heranzurücken.

zusammenfallen, wird wenigstens derjenige Strich der Sternfigur noch vollkommen deutlich erscheinen, dessen Richtung der Richtung der vorderen Brennlinien parallel ist. Da diese aber die Richtung der hinteren Brennlinie senkrecht überkreuzt, so muss an der Nahegrenze des Sehens diejenige Linie der Sternfigur am deutlichsten erscheinen, welche auf der an der Ferngrenze am deutlichsten gesehenen senkrecht steht. An meinen eigenen Augen kann ich z. B. gegenwärtig in dieser Beziehung folgendes feststellen. Dem linken Auge erscheint an der Ferngrenze am deutlichsten eine Linie, deren linkes Ende sich etwa 5—10^0 Grad unter den Horizont neigt und an der Nahegrenze eine solche deren oberes Ende sich ein wenig nach links von der Vertikalen entfernt, die also auf jener ersteren in der That merklich senkrecht steht. Dem rechten Auge erscheint an der Ferngrenze am deutlichsten eine Linie deren oberes Ende unter einem Winkel von etwa 15^0 von der Vertikalen nach links abweicht an der Nahegrenze eine solche die sich links unter einem eben solchen Winkel unter den Horizont neigt. Die an der Fern- und Nahegrenze deutlichst gesehenen Linien stehen also gleichfalls auf einander senkrecht.

Wenn sich bei einem Augen von dieser gesetzmässigen Beziehung grössere oder kleinere Abweichungen finden sollten, so würde dies darauf deuten, dass durch die Anpassungsveränderung des Auges der Astigmatismus wesentlich verändert wird, was an sich keineswegs unmöglich ist, da ja derselbe theilweise von der Gestalt der Linsenflächen bedingt ist. Die Meridianebene stärkster Krümmung hat wie schon aus den angeführten Beispielen. ersichtlich ist, bei verschiedenen Augen verschiedene Lage, doch soll nach SNELLEN [1] die nahezu verticale Lage derselben am häufigsten sein.

Für einen bestimmten Zustand des Auges z. B. den Ruhezustand des Akkommodationsapparates ist offenbar dem Astigmatismus ein bestimmter numerisch ausdrückbarer Grad zuzuschreiben. Die Wahl einer Grösse deren numerischer Werth zweckmässig zum Maasse des Astigmatismus dienen kann, wird auf dasselbe Princip zu gründen sein, welches wir zur Messung des Refraktionszustandes (Myopie, Emmetropie, Hypermetropie) des ideal gedachten Auges angewandt haben. In der That können wir ja den Astigmatismus so auffassen, als käme dem Auge in verschiedenen Meridianen ein verschiedener Grad von Myopie (negative Werthe nicht ausgeschlossen) zu. Wäre nämlich das Auge rings um die Axe so gestaltet wie im Meridian stärkster Brechung dem die hinteren Brennlinien parallel sind, so

1 SNELLEN, Arch. f. Ophthalmologie XV. 2. Abth. S. 199.

würde es in einem gewissen Betrage stärker myopisch sein, als wenn es rings um die Axe so gestaltet wäre, wie in dem Meridane schwächster Brechung. Die Differenz zwischen diesen beiden Myopiegraden giebt offenbar das geeignetste Maass für den Grad des Astigmatismus.

Man kann diese Differenz auf verschiedene Art ermitteln. Am nächsten liegt es ganz einfach optometrisch zu verfahren. Man kann ja durch Vorsetzen eines engen Spaltes vor das Auge bewirken, dass von jedem aus einem leuchtenden Punkt ausgehenden Strahlenbündel nur ein ebenes Büschel ins Auge gelangt, welches sich nur in einer Meridianebene oder nahezu in einer solchen weiter fortpflanzt und mithin da punktuell vereinigt wird, wo das ganze Bündel zur punktuellen Vereinigung käme, wenn das Auge rings um die Axe so gestaltet wäre, wie in dem betreffenden Meridiane. Lässt man also das Auge durch einen solchen Spalt ein geeignetes Probeobjekt betrachten, so kann man die Sehweite für den Meridian direkt abmessen d. h. die Entfernung, in welcher das Objekt durch den Spalt gesehen, am deutlichsten erscheint. Das geeignetste Probeobjekt für diese Untersuchung bildet ein System feiner schwarzer Linien, deren Richtung zur Richtung des Spaltes senkrecht steht. An einem solchen muss nämlich jede Undeutlichkeit am leichtesten bemerklich werden, weil die zur Wirksamkeit kommenden Büschel vor und nach ihrer punktuellen Vereinigungen den auffangenden Schirm in einer Linie schneiden die auf der gedachten Richtung der Objektlinien senkrecht steht. Hat man nun die Richtung der vorderen und hinteren Brennlinie für das Auge zuvor schon ermittelt, so wird man nur diese beiden Meridiane zu prüfen haben. Man ermittelt nämlich die Sehweiten für dieselben in der beschriebenen Art, indem man einmal den Spalt in die Meridianebene der vorderen und dann in die Meridianebene der hinteren Brennlinie bringt. Wenn man dann die reciproken Werthe der beiden gefundenen Sehweiten in pariser Zollen ausgedrückt von einander abzieht und die Differenz in die Form eines Bruches mit dem Zähler 1 bringt, hat man das konventionelle Maass des Astigmatismus.

Eine Prüfung nach dem vorstehenden Princip könnte auch mit einem auf den Scheiner'schen Versuch gegründeten Optometer ausgeführt werden wenn man in den Okularschirm statt der üblichen beiden Schlitze bloss zwei Löchelchen anbrächte und diesen Schirm um die Axe des Instrumentes drehbar einrichtete, so dass die Verbindungslinie der beiden Löchelchen in jede beliebige Meridianebene des Auges bringen könnte. Als Objekt müsste dabei ein einzelner leuchtender Punkt oder eine leuchtende Linie angewandt werden deren Richtung jedesmal senkrecht stehen müsste auf der Richtung der Verbindungslinie der beiden Okularlöchelchen d. h. auf der Meridianebene, welche untersucht wird. Einrichtungen dieser letzteren Art scheinen indessen bei den Augenärzten nicht in Gebrauch zu sein, dagegen liefern die für ophthalmologische Zwecke arbeitenden Werkstätten Bestecke zur optometrischen Bestimmung des Astigmatismus nach der ersten Art, die einen mit Handgriff versehenen Okularschirm enthalten. Derselbe ist in der Fassung in seiner Ebene drehbar, so dass ein darin befindlicher schmaler Spalt bequem in jede Meridianebene des Auges gebracht werden kann. Als Probeobjekt ist ein Drahtgitter in einem Rähmchen mit Handgriff beigegeben, das vor einem hel-

len Hintergrund in die passende Sehweite so gestellt wird, dass die Stäbe des Gitters senkrecht auf der jeweiligen Richtung des Okularspaltes stehen.

Auch zu dem S. 75 erwähnten Gräfe'schen Optometer liefern die optischen Werkstätten einen Schirm mit Spalt, der vor das Okular gesetzt und gedreht werden kann, so dass man damit die Sehweite in verschiedenen Meridianebenen gesondert prüfen kann. Natürlich muss dann das entfernte Objekt so ausgewählt werden, dass darin feine Linien vorkommen, deren Richtung wieder zur jeweiligen Lage des Okularspaltes senkrecht steht, damit an ihnen die Undeutlichkeit bei der geringsten Abweichung von der punktuellen Vereinigung der wirksamen Büschel auf der Netzhaut bemerkbar wird.

Der Grad des Astigmatismus kann noch auf einem andern Wege ermittelt werden, der, so verschieden er von dem soeben beschriebenen auch erscheint, doch zu demselben Ziele, d. h. im bestimmten Falle zu demselben Zahlwerth führen muss. Denken wir uns ein Strahlenbüschel durch einen Okularspalt aus dem Bündel ausgeschnitten in der Meridianebene der vorderen Brennlinie und die Retina des Auges so gelegen, dass sie diese Brennlinie aufnimmt. Jetzt ist leicht zu sehen, dass man durch eine vor das Auge in richtige Lage gesetzte convexe Cylinderlinse von geeigneter Krümmung die Divergenz des einfallenden Büschels so weit vermindern kann, dass sich seine Strahlen genau in der Netzhaut schneiden, wo sie ohne die Cylinderlinse noch auf der Ausdehnung der vorderen Brennlinie zerstreut waren. Unter einer Cylinderlinse versteht man ein Glasstück, welches begrenzt ist von zwei Theilen zweier Cylindermäntel deren Axen parallel sind aber nicht zusammenfallen. Einer der Cylindermäntel kann auch eine Ebene sein. Man unterscheidet wie bei Kugellinsen convexe und concave, erstere wirken sammelnd mögen sie biconvex, planconvex oder concavconvex sein, letztere wirken zerstreuend mögen sie biconcav, planconcav oder convexconcav sein. Die Stellung der Cylinderlinse muss so gewählt sein, dass die unter sich parallelen Axen der beiden Cylinder, von welchen die Linsenflächen Abschnitte bilden, senkrecht stehen zur Ebene des untersuchten Augenmeridianes oder was dasselbe sagt, dass die Ebenen stärkster Krümmung der Linsenflächen jener Meridianebene parallel sind. Nimmt man jetzt den Okularschirm weg, dessen Spalt aus dem Bündel das Büschel ausschnitt (der überhaupt nur zur Erleichterung der Vorstellungen hinzugedacht war), so werden sich offenbar sowohl die in der Ebene der vorderen Brennlinie als die in der Ebene der hinteren Brennlinie fortgepflanzten Strahlen auf der Netzhaut punktuell vereinigen. Die letzteren Strahlen nämlich thaten es der gemachten Voraussetzung nach schon ohne Einschiebung der Linse. Ihr Gang wird aber durch dieselbe nicht wesentlich beeinflusst da sie bei der gedachten Lage durch dieselbe hindurchgehen müssen wie durch eine planparallele Glasplatte. Ist nun das Bündel nur überhaupt sehr dünn, wie bei allen unsern dioptrischen Betrachtungen immer vorausgesetzt wird, so werden auch die anderen Strahlen desselben in demselben Punkte vereinigt und werden wir also auf der Netzhaut ein sehr annähernd punktuelles Bild haben. Der Astigmatismus wird „durch die Cylinderlinse korrigirt sein“. Ebenso wie man durch eine convexe Cy-

linderlinse den Astigmatismus so korrigiren kann, dass die punktuelle Vereinigung im Mittelpunkt der vorderen Brennlinie stattfindet, kann man ihn auch durch eine concave Cylinderlinse derart korrigiren, dass die sämmtlichen Strahlen des Bündels im Mittelpunkte der hinteren Brennlinie vereinigt werden. Natürlich muss alsdann die Axenrichtung der Cylinderflächen der Linse senkrecht auf dem Meridiane stärkster Brechung d. h. also auf der Richtung der hinteren Brennlinie stehen.

Ist das zu prüfende Auge mehr oder weniger myopisch, so kann man aus einer hinlänglich grossen Auswahl von concaven Cylinderlinsen leicht diejenige herausfinden, welche den Astigmatismus gerade korrigirt. Man braucht nur an der Ferngrenze des Sehens dem Auge eine Sternfigur darzubieten und ihm dann die verschiedenen concaven Cylinderlinsen in der geeigneten Lage vorzusetzen, die man ja nach vorausgegangener Ermittelung des Meridianes stärkster Brechung von vornherein bestimmen kann. Es wird bald diejenige gefunden sein, durch welche alle Linien der Sternfigur mit gleicher Deutlichkeit gesehen werden. Diese muss offenbar die Eigenschaft haben, dass sie die Divergenz des auf den Meridian stärkster Brechung fallenden Büschels soweit vermehrt, dass es nunmehr auch erst da zur Vereinigung kommt, wo ohne und mit Cylinderlinse die Strahlen des auf den Meridian schwächster Brechung fallenden Büschels vereinigt werden, welcher Punkt in die Retina fällt, wenn sich die Objektpunkte an der Ferngrenze des Sehens befinden.

Man kann nun bei einer Cylinderlinse auch von einer Brennweite reden, wenn man darunter versteht die Entfernung des Punktes, wo sich die Strahlen eines Büschels durchschneiden, das in einer zur Axenrichtung der Cylinderflächen senkrechten Ebene fortgepflanzt wird und vor der Brechung aus parallelen Strahlen bestand. Dieser Brennweite ist wie bei einer Kugellinse im Falle der Convexität ein positiver im Falle der Concavität ein negativer Werth beizulegen.

Hat man die den Astigmatismus korrigirende Cylinderlinse, mag die Correktion durch eine convexe oder durch eine concave bewerkstelligt sein, gefunden, so ist der reciproke Werth ihrer Brennweite, der unter allen Umständen positiv zu nehmen ist, das Maass des Astigmatismus. Dass dies Maass mit dem zuerst definirten numerisch übereinstimmen muss, ist leicht zu sehen. In der That sei a die deutliche Sehweite für den Meridian stärkster Brechung und b die für den Meridian schwächster Brechung, so dass also $a < b$ wäre, dann hätten wir den Grad des Astigmatismus nach der ersten Bestimmungsweise zu setzen

$$= \frac{1}{a} - \frac{1}{b}.$$

Nun würde aber die negative Brennweite einer zerstreuenden Cylinderlinse offenbar

$$= \frac{b\,a}{a-b}$$

sein müssen wenn sie in richtiger Lage vor das Auge gebracht einem aus der Entfernung b kommenden auf den Meridian stärkster Brechung fallenden Büschel denjenigen Divergenzgrad beibringen sollte, dass es ebenfalls erst da vereinigt wird, wo ein auf den Meridian schwächster Brechung fallendes Büschel vereinigt wird. Dieser Divergenzgrad müsste

nämlich derjenige sein, welcher ein von der Entfernung a ausgegangenes Büschel besitzt. Auf eine Cylinderlinse von dieser negativen Brennweite würde also die Wahl des geprüften Auges fallen um den Astigmatismus zu korrigiren und der reciproke Werth ihrer Brennweite

$$= \frac{a-b}{a\,b}$$

positiv genommen d. h.

$$\frac{b-a}{a\,b} \text{ wäre } = \frac{1}{a} - \frac{1}{b}$$

d. h. gleich dem auf die andere Art bestimmten Maasse des Astigmatismus. Eine ganz ähnliche Schlussweise führt zu der Einsicht, dass auch bei Korrektion mit convexer Cylinderlinse der reciproke Werth ihrer Brennweite den Grad des Astigmatismus angiebt.

In der Tabelle S. 106 ist in der vorletzten Spalte der Grad des Astigmatismus der einzelnen Augen numerisch angegeben.

Nach den Erfahrungen der Augenärzte bringt der Astigmatismus wenn er den numerischen Werth von $^1/_{40}$ nicht erreicht keinerlei Störung im gewöhnlichen Sehakte hervor und kann als normal gelten. Ueberschreitet er dagegen diesen Werth, so veranlasst er auch beim gewöhnlichen Sehen Störungen. Ist er dabei ganz regelmässig, so können seine Folgen durch Vorsetzen einer geeigneten Cylinderlinse leicht beseitigt werden. Eine ausführliche Besprechung des hochgradigen Astigmatismus ist Gegenstand der Pathologie des Auges und kann hier unterbleiben.

Es kann jetzt noch die Frage aufgeworfen werden, wie im Innern des Bereiches des Akkommodationsspatiums das Auge instinktiv eingerichtet wird. Hier ist es nämlich offenbar an sich möglich einen beliebigen Theil der Brennstrecke mit der Netzhaut zusammenfallen zu machen. Es ist zu vermuthen, dass man beim einzelnen Sehakte vielleicht mit dem Akkommodationszustande hin- und herschwankt und bei demjenigen stehen bleibt, der das günstigste Resultat für die Deutlichkeit ergiebt. Je nach der Gestalt des zu sehenden Objektes kann dies ein verschiedener sein. Gilt es z. B. im Objekte vorwiegend parallele Linien zu erkennen und stimmt ihre Richtung mit derjenigen der hinteren Brennlinien überein, so wird eine Einstellung am günstigsten sein, bei welcher die hinteren Brennlinien der Strahlenbündel in die Netzhaut fallen, und umgekehrt. Man bemerkt oft auch, dass jemand, der einen fernen Gegenstand mit dem Auge recht genau untersuchen will, den Kopf hin- und herneigt. Offenbar hat dies den Zweck, bald diese bald jene Linien des Objektes mit der Richtung derjenigen Brennlinien in Uebereinstimmung zu bringen, welche gerade in die Retina fallen.

III. Unregelmässigkeiten des brechenden Apparates.

Ausser der im vorigen § behandelten zeigt der brechende Apparat des Auges noch zahlreiche unregelmässige Abweichungen von einem centrirten Systeme sphärischer Trennungsflächen zwischen homogenen brechenden Medien. Sämmtliche Medien des Auges sind nämlich keineswegs ganz gleichartige durchsichtige Körper. Dies ist schon darum nicht möglich, weil sie mit Ausnahme der wässrigen Feuchtigkeit „Gewebe“ sind, d. h. Körper, die aus ursprünglich getrennten Theilen zusammengefügt sind. Es kann natürlich nicht erwartet werden, dass diese Theile und die Tränkungsflüssigkeit zwischen ihnen absolut gleichen Brechungsindex besitzen. Sowie aber dies nicht der Fall ist, muss an den Grenzen der Gewebselemente Reflexion und Lichtzerstreuung stattfinden. Dass dem wirklich so ist, gewahrt man, wenn man einen starken Lichtkegel ins Auge sendet. Sofort wird der beleuchtete Theil der Hornhaut und der Linse sichtbar, d. h. sendet unregelmässig zerstreutes Licht von jedem Punkte aus. Dies beweist, dass ein Strahl nicht lediglich auf dem Wege regelmässiger Brechung durchgeht resp. zum Theil an der Grenze des ganzen Mediums regelmässig zurückgeworfen wird.

Das unregelmässig zerstreute Licht muss zum Theil auch zur Retina gelangen und dieselbe mit einem mehr oder weniger gleichmässigen Lichtnebel überziehen, aus welchem sich die der regelmässigen Brechung ihren Ursprung verdankenden Bilder hervorheben. Dieser allgemeine Lichtnebel stört indessen den gewöhnlichen Sehakt durchaus nicht, weil er die Helligkeitsabstufungen der deutlichen Bilder nur sehr wenig im Sinne einer Ausgleichung der Unterschiede beeinflusst. Für gewöhnlich beachtet man nicht einmal das Vorhandensein desselben, so leicht es auch zu bemerken ist. Man braucht nur Abends in einem beleuchteten Zimmer die von der Lampenflamme direkt ins Auge gelangenden Strahlen abzublenden, sogleich wird man bemerken, dass irgend ein dunkler Winkel viel schwärzer erscheint, und dass darin Helligkeitsunterschiede wahrnehmbar werden, die vorher unmerklich waren, weil sie verwischt wurden durch den Lichtnebel, welcher von den mit direktem Lampenlicht beleuchteten Theilen der brechenden Medien ausging.

Ausser diesen überall ziemlich gleichmässig im Auge verbreiteten Ursachen der Lichtzerstreuung kommen aber noch gröbere Unregelmässigkeiten vor, die zu besonderen Erscheinungen Veranlassung geben. Bei passender Einstellung des Auges werden sich natürlich diese Unregelmässigkeiten ebensowenig bemerklich machen wie die

gleichmässige Trübung der brechenden Medien. Jeder Strahl eines Bündels nämlich, welcher auf eine gröbere Unregelmässigkeit trifft, wird zurückgeworfen absorbirt oder seitwärts gebrochen, fällt also aus dem Bündel aus. Vereinigen sich nun die übrigen regelmässig weitergehenden Strahlen auf einen Punkt der Netzhaut, so wird man nichts bemerken. Nur wenn die Unregelmässigkeiten ihren Sitz ganz hinten im Glaskörper haben, da wo die zu den Bildpunkten konvergirenden Strahlenbündel schon überaus dünn sind, können sie ganze solche Bündel abfangen und Lücken oder Schatten im deutlichen Bilde erzeugen, die unter dem Namen der „fliegenden Mücken" bekannt sind.

Sowie aber die Einstellung des Auges fehlerhaft ist, so dass jedem leuchtenden Punkte ein Zerstreuungskreis auf der Netzhaut entspricht, so machen sich die gröberen Unregelmässigkeiten durch Schattenwerfen geltend. Mag nämlich der Zerstreuungskreis dadurch entstehen, dass der Bildpunkt vor oder hinter die Retina fällt, so werden in ihm ebenso viele dunklere Stellen sein als gröbere Unregelmässigkeiten auf dem Wege des Strahlenbündels lagen. In der That sieht auch der Zerstreuungskreis eines einzelnen leuchtenden Punktes im Auge durchaus nicht so aus wie eine gleichmässig beleuchtete runde Scheibe, sondern man sieht innerhalb der im allgemeinen kreisförmigen oder wegen des Astigmatismus etwas ovalen Umgrenzungslinie hellere und dunklere Stellen in unregelmässigem Wechsel nebeneinander. Ein kurzsichtiges Auge kann sich diesen Anblick leicht verschaffen durch Anblicken eines hellen Sternes oder einer fernen Flamme z. B. einer Strassenlaterne in dunkler Nacht. Ein Normalsichtiger müsste eine convexe Linse dabei vor das Auge nehmen Um einen einzelnen leuchtenden Punkt zu nahe vor dem Auge zu haben, braucht man nur ein feines Löchelchen in einem schwarzen Kartenblatt einige Centimeter vom Auge entfernt vor einen hellen Hintergrund zu bringen. Hier zeigt sich wesentlich dieselbe Erscheinung.

Regelmässig hat in der Zerstreuungsfigur die Lichtvertheilung einen mehr oder weniger ausgesprochen sternförmigen Charakter. Dies hängt ganz entschieden mit dem sternförmigen Bau der Linse zusammen, doch ist eine strenge Erklärung der Einzelheiten noch nicht gegeben. Ebenso dürfte die nicht zu bezweifelnde Thatsache noch der Erklärung warten, dass immer gegen den Rand des Zerstreuungskreises die durchschnittliche Helligkeit geringer ist als in der Mitte, wenn der Zerstreuungskreis durch zu grosse Ferne des leuchtenden Punktes bedingt ist.

Aus der beschriebenen ungleichmässigen Lichtvertheilung im Zer-

streuungsfelde erklärt sich ferner noch leicht die Thatsache, dass linienförmige Objekte bei unpassender Einrichtung des Auges für ihre Entfernung meist scheinbar mehrfach gesehen werden. In der That denken wir uns an Stelle des einzelnen leuchtenden Punktes eine leuchtende Gerade, so wird sich auf der Netzhaut die Zerstreuungsfigur sovielemale in stetiger Folge nebeneinanderlegen als die Gerade Punkte enthält. Die auffallend hellen Stellen der Zerstreuungsfigur werden sich dabei zu ebensovielen Bildern der Linie aneinanderreihen, zwischen denen die dunkleren Stellen der Zerstreuungsfigur wegen des Contrastes ganz übersehen werden. Die Linie wird also mehrfach erscheinen. Dasselbe wird auch noch stattfinden, wenn das Objekt nicht eine unendlich feine Linie ist, sondern ein Flächenstreif, dessen Breite nur so klein ist, dass ihr genaues Bild auf der Netzhaut schmäler wäre als die Zerstreuungsfigur eines Punktes. Aus diesem Grunde sehen Kurzsichtige stets den Mond, besonders den sichelförmigen, scheinbar mehrfach.

Die Lage und Grösse der Schatten von gröberen Unregelmässigkeiten auf der Retina wird der wirklichen Lage und Grösse derselben um so genauer entsprechen, je annähernder parallelstrahlig das im Auge fortgepflanzte Bündel ist. Auf diese Bemerkung gründet sich eine Methode, kleine Körperchen im Auge zu untersuchen oder wie man sich ausdrückt „entoptisch wahrzunehmen“.

Man bringe einen leuchtenden Punkt in die vordere Brennebene des Auges, also etwa 12 mm. vor die Hornhaut, dann wird das von ihm ausgesandte Strahlenbündel den Glaskörper ziemlich parallelstrahlig durchlaufen und auf der Netzhaut eine Zerstreuungsfigur beleuchten, welche der Pupille ähnlich und ein wenig grösser als sie ist. Der leuchtende Punkt ist am leichtesten herzustellen, indem man in ein schwarzes Kartenblatt mit einer Nadel ein feines Löchelchen sticht und das Blatt senkrecht zur Axe des Auges in etwa 12 mm. Entfernung von der Hornhaut hält vor einem ausgedehnten gleichmässig leuchtenden Hintergrund. Auch das von einer Sammellinse gelieferte physische Bild eines stark leuchtenden Punktes kann zweckmässig verwendet werden. Kleine Bewegungen des Objektpunktes in der vorderen Brennebene lassen sich durch Verschiebungen des Kartenblattes bei der ersten Versuchsweise leicht ausführen. Solche haben den Erfolg, dass das parallelstrahlige Bündel abwechselnd in verschiedener Richtung den Glaskörper durchläuft und verschiedene Stellen der Netzhaut trifft. Dabei treten dann auch oft Schatten von zwei Körperchen auseinander, welche bei der ersten Stellung des Lichtpunktes zusammenfielen, weil sie in der ersten Richtung des Strahlenbündels genau hintereinander liegen. Auch verschieben sich

die Schatten der Körperchen relativ gegen den Rand des Zerstreuungsfeldes. Aus dieser Verschiebung kann man dann beurtheilen, ob das schattenwerfende Körperchen vor oder hinter der Pupillenebene seinen Sitz hat. Wie ein Blick auf die nebenstehende Fig. 28 zeigt, wird bei einer Verschiebung des Lichtpunktes in einer gewissen Richtung der Schatten eines Körpers vor der Pupille relativ im Zerstreuungskreise in entgegengesetzter Richtung verschoben. Der Schatten eines Körpers hinter der Pupillarebene wird in gleichem Sinne verschoben und der Schatten eines Körpers in der Pupillarebene behält seine relative Stellung im Zerstreuungskreise. Verschiebt man z. B. den Lichtpunkt nach unten, so rücken die Schatten der drei Körper v, i, h, die ursprünglich (unter A) dicht aneinander lagen auseinander, wie es unter B, siehe $v, i, h,$ gezeichnet ist, und zwar ist v, dem oberen Rande des Zerstreuungskreises r_o dagegen h, dem unteren Rande r_u näher gerückt, während der Schatten des in der Pupillarebene gelegenen Körpers i nach wie vor in der Mitte des Zerstreuungskreises liegt. Bei der subjektiven Auffassung dieser Schatten muss man natürlich beachten, dass die Empfindungen verkehrt nach aussen projicirt werden, so dass dem oberen Rand des Zerstreuungskreises der untere Rand eines scheinbaren Objektes entspricht und umgekehrt.

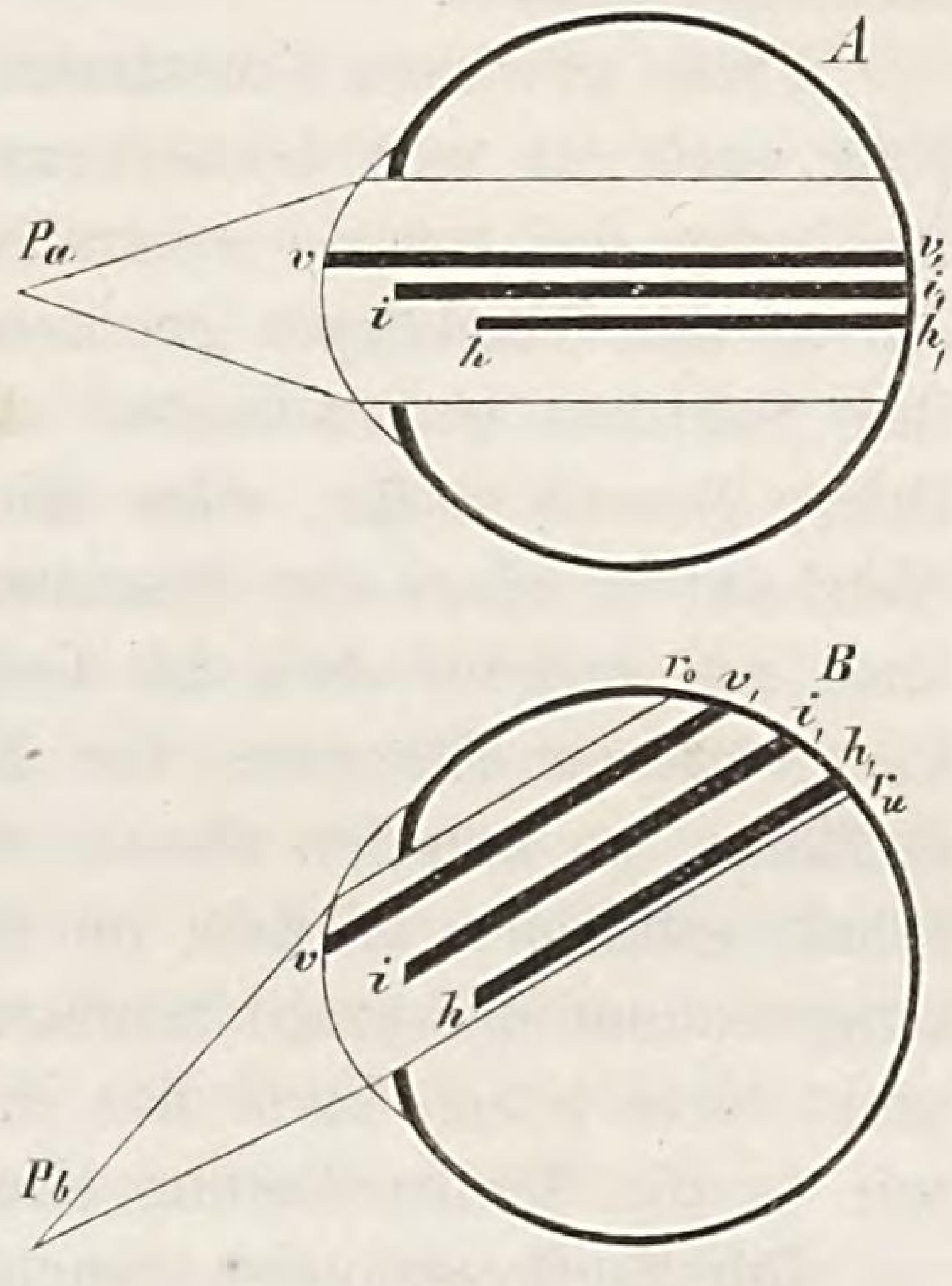


Fig. 28.

Unter den verschiedenen Körperchen, deren Schatten sich bei der entoptischen Beobachtung gewöhnlich zeigen, sind folgende Arten zu unterscheiden.

1. Tröpfchen auf der vorderen Hornhautfläche von Schleim oder dem Sekrete der Meibom'schen Drüsen. Ihre Schatten zeigen sich meist als dunkle Flecken mit heller Mitte und leicht daran kenntlich, dass sie beim Blinzeln verschwinden oder Lage und Gestalt verändern.

2. Perlflecke von grösserer Beharrlichkeit. Listing hält sie für die Schatten von Schleimklümpchen in der Flüssigkeit zwischen Linsenkörper und Linsenkapsel.

3. Eine matte sternartige Zeichnung vom strahligen Bau der Linse herrührend.

4. Verschiedene unregelmässige Gebilde fadenartiger und perl-

schnurartiger Gestalt. Sie sind die Schatten von Unregelmässigkeiten im Glaskörper, die meist beweglich sind.

Endlich ist zu erwähnen, dass das ganze entoptische Gesichtsfeld wie bestäubt erscheint, was offenbar von den feinsten überall mehr gleichmässig verbreiteten Unregelmässigkeiten der brechenden Medien herrührt.

Unter gewissen Umständen taucht bei der entoptischen Beobachtung noch ein sehr bemerkenswerthes Objekt auf, nämlich die Verzweigung der arteria centralis retinae. Diese liegt bekanntlich in der an den Glaskörper grenzenden Schicht der Netzhaut. Wenn also ihre Schatten wahrnehmbar sind, so ist dies ein direkter thatsächlicher Beweis dafür, dass die durch Licht reizbaren Elemente der Netzhaut in einer der äusseren Schichten dieser Membran zu suchen sind, auf welche eben die Gefässe Schatten werfen können. Lägen die reizbaren Elemente der Netzhaut in derselben Schicht wie die Gefässe, so müssten diesen ebenso viele niemals mit Empfindungsinhalt erfüllbare Lücken im Gesichtsfelde entsprechen, da sie einer entsprechenden Anzahl reizbarer Elemente den Platz wegnähmen und nicht bloss einen Theil des ihnen sonst zukommenden Reizquantums, wie es die Wahrnehmung eines Schattens erfordert.

Die Gefässschatten tauchen nun im entoptischen Gesichtsfelde dann auf, wenn man den leuchtenden Punkt in der vorderen Brennebene ein wenig schnell hin- und herbewegt. Bewegt man den Punkt auf und ab, so erscheinen nur Gefässzweige, die nahezu wagrecht verlaufen. Bewegt man ihn von rechts nach links, so erscheinen nur fast senkrechte Zweige. Die Stelle des direkten Sehens ist stets frei von Gefässschatten, wie es ihre Gefässlosigkeit erwarten lässt.

Die Gefässschatten sind bei dieser Beobachtungsart sehr zart gezeichnet und wie gesagt nur bruchstückweise zu erkennen. Es ist daher von Interesse, noch zwei andere Methoden kennen zu lernen, nach denen man ein weit vollständigeres Bild von der Gefässverzweigung im eigenen Auge bekommt. Die erste dieser Methoden besteht darin, dass man mittels einer kleinen Sammellinse ein möglichst kleines Sonnenbildchen auf einem Punkte der Sklerotika entwirft, welcher möglichst weit vom Hornhautrande abliegt, während man nach einem gleichmässig dunklen Hintergrunde blickt. Dieser überzieht sich dann scheinbar mit einem bronzefarbenen Schleier in welchem deutlich der ganze Gefässbaum der vasa centralia retinae dunkel gezeichnet ist, die Stelle des deutlichsten Sehens erscheint auch hier natürlich gefässlos und hat ein Ansehen, welches Helmholtz mit chagrinirtem Leder vergleicht, auch zeigt sie einen stär

keren Glanz. Behält das Sonnenbildchen seine Lage dauernd bei, so wird allmählich die Erscheinung matter, um zuletzt ganz zu verschwinden. Jede kleine Bewegung des Sonnenbildchens ruft sofort die Erscheinung wieder hervor und es bewegt sich dabei der Gefässbaum in gleichem Sinne mit dem Sonnenbildchen, der glänzendere Fleck aber bewegt sich ein wenig in entgegengesetzter Richtung. Die Erscheinung beruht darauf, dass das Sonnenbildchen auf der Sklerotika diese gleichsam selbstleuchtend macht. Das von diesem Punkte der Sklerotika ins Innere des Auges gesandte Licht wird nun durch die pigmentirte Chorioidea nicht ganz abgehalten, besonders wenn der beleuchtete Punkt noch ausserhalb der Ciliarfortsätze liegt, wo die Pigmentanhäufung nicht so gross ist. Da nun also der ganze Glaskörper von einem Punkte aus durchstrahlt ist, so werden die Gefässe grosse Schatten in den äusseren Schichten der Netzhaut werfen und da sie auf derselben ungewohnte Stellen fallen, so werden sie bemerkbar. Dass sich die als scheinbare Objekte nach aussen projicirten Schatten mit einer Bewegung des Lichtpunktes gleichsinnig bewegen ist selbstverständlich, da die Schatten selbst sich in entgegengesetztem Sinne bewegen müssen. Warum sich die wie chagrinirtes Leder aussehende Figur im gelben Fleck der Netzhaut umgekehrt bewegt, ist noch nicht erklärt, es deutet aber jedesfalls auf eine andere Entstehungsart dieser Figur.

Die zweite Methode zur Darstellung der Aderfigur besteht in folgendem: Während man auf einen möglichst dunklen Hintergrund blickt, hält man weit seitlich von der Augenaxe eine stark leuchtende Flamme. Der dunkele Hintergrund scheint sich auch hier mit einem gelblichen Lichtnebel zu überziehen, aus welchem bei kleinen Bewegungen der Flamme die Schatten der Gefässverzweigungen schwarz gezeichnet auftauchen.

Der Stelle des deutlichsten Sehens entspricht bei dem Versuche eine hellere Stelle auf einer Seite von einem halbmondförmigen Schatten eingefasst.

Bei Bewegungen der Flamme bewegen sich die Schatten der Gefässe im Gesichtsfelde im gleichen Sinne, wenn die Bewegung in einer Meridianebene stattfindet. Geht dagegen die Bewegung senkrecht zu einer Meridianebene vor sich, so bewegen sich die Schatten entgegengesetzt wie die Flamme.

Die soeben beschriebenen Erscheinungen sind zum grössten Theil schon von PURKINJE beobachtet, aber erst viel später ist von H. MÜLLER die richtige Erklärung gegeben. Sie beruht darauf, dass ein sehr helles Netzhautbildchen bei sonst sehr dunkelem Gesichts-

felde als eine Lichtquelle anzusehen ist, welche nach allen Seiten Strahlen aussendet. Dem entspricht der allgemeine Lichtnebel, welcher das dunkele Gesichtsfeld überzieht. Sei beispielsweise *a* in Fig. 29 die Flamme, dann wird ihr Netzhautbild *b* Strahlen aussenden, welche den ganzen Augenhintergrund beleuchten, befindet sich nun bei *v* ein Gefässquerschnitt, so wird der von *b* nach *c* gehende Strahl abgefangen und der an die ungewohnte Stelle bei *c* fallende Schatten des Gefässes wird bemerkt und im Gesichtsfelde in der Richtung nach *d* projicirt. Bewegt sich die Flamme von *a* nach *α* so rückt das Netzhautbild von *b* nach *β*, der Schatten von *c* nach *γ*, die Netzhautstelle *γ* setzt aber die Ursache ihrer Erregung in der Richtung *δ* nach aussen. Das scheinbare Schattenobjekt hat sich also in gleichem Sinne von rechts nach links wie die Lichtflamme bewegt. Anders muss es sich bei einer Bewegung der Flamme senkrecht zur Meridianebene verhalten. Geht z. B. die Flamme vom Punkte *a* weg hinter die Ebene des Papieres, so geht das Bild von *b* weg vor dieselbe, der Schatten *c* geht dahinter und endlich das scheinbare Objekt *d* vor die Ebene des Papieres, macht also eine Bewegung in umgekehrtem Sinne wie die Flamme.

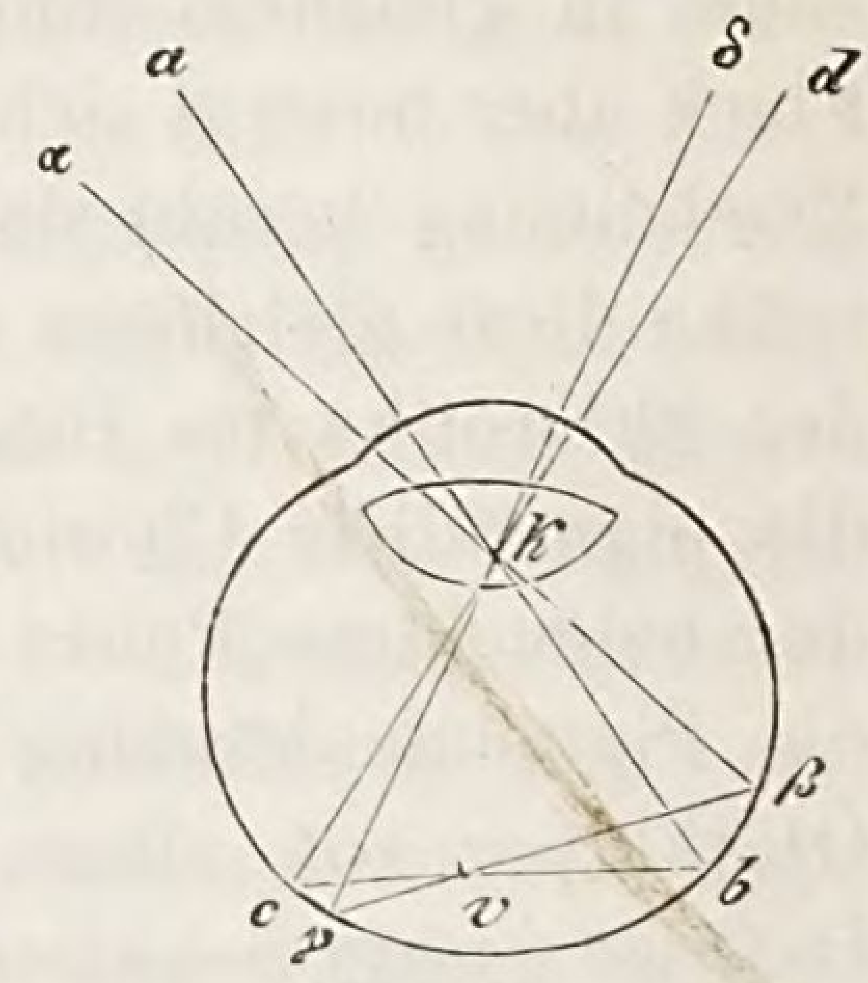


Fig. 29.

Den halbmondförmigen Schatten in der Gegend des deutlichsten Sehens erklärt Müller für den Schatten, welchen der dem hellen Netzhautbildchen zugewandte Rand der Netzhautgrube in diese hinein werfen muss.

Derselbe Forscher hat noch versucht die Bewegungen der Gefässschatten zu benutzen, um zu bestimmen, wie weit hinter der gefässführenden Schicht diejenige Schicht der Netzhaut liegt, welche die durch das Licht gereizten Elemente enthält. Es ist nämlich klar, dass unter sonst gleichen Umständen die Bewegung der Schatten um so grösser sein muss, je weiter vor der reizbaren Schicht die Gefässe liegen und wenn man also die Verschiebung der Schatten misst bei einer gleichfalls gemessenen Verschiebung der Lichtquelle, so kann man die Entfernung der Gefässe von der reizbaren Schicht berechnen. H. Müller benutzte zur Berechnung die erst beschriebene Beobachtungsart der Gefässschatten, wo als Lichtquelle ein auf der Sklera entworfenes Sonnenbildchen diente. Eine Verschiebung desselben wurde mit dem Zirkel direkt gemessen und gleichzeitig die Verschiebung der scheinbaren Schattenobjekte beobachtet. Auf Grund leicht herzustellender Construktionen fand Müller, dass die reizbare

Schicht der Netzhaut etwa 0,2 bis 0,3 mm. hinter der gefässführenden liegen müsse. Die reizbare Schicht der Netzhaut ist hiernach jedesfalls eine der äussersten. Es werden sich aus der Lehre von der Lichtempfindung später noch Gründe ergeben, aus welchen man die Eigenschaft der Reizbarkeit durch Licht der äussersten Schicht der Netzhaut, nämlich der Stäbchen- und Zapfenschicht zuschreiben muss.

Dass beim gewöhnlichen Sehakte die Schatten der Gefässe nicht auffallen, hat seinen Grund theils darin, dass hierbei keine eigentlichen Kernschatten in der reizbaren Netzhautschicht entstehen. Ist nämlich das ganze Sehfeld mit mehr oder weniger hellen Objekten erfüllt, so wirkt die Pupille gleichsam wie eine leuchtende Scheibe. Da nun die stärksten Zweige der v. centralis retinae nur 0,038 mm. dick sein sollen, so würde ihr Kernschatten — eine 4 mm. weite Pupille als Lichtquelle gedacht — nur etwa 0,17 mm. lang sein, also noch nicht bis in die reizbare Stäbchenschichte reichen. Die verwaschenen Halbschatten werden aber unbemerkt bleiben, weil sie sich beständig auf denselben Netzhautelementen halten und diese daher durch die relative Schonung an Reizbarkeit gewinnen, was ihnen an Reizstärke durch die Beschattung entgeht.

Wenn diese längst allgemein anerkannte Erklärung für die Unmerklichkeit der Gefässschatten beim gewöhnlichen Sehen richtig ist, so müssen dieselben bei erstem Aufschlag der Augen auf jedem hellen Hintergrund erscheinen[1], wenn das Auge längere Zeit geschlossen war, so dass alle Elemente der Netzhaut eine gleiche Reizbarkeit erlangt haben. Dies kann man in der That sehr leicht beobachten. Ich sehe einige Gefässschatten beim ersten Augenaufschlag schon aufblitzen, wenn ich das Auge nur eine einzige Minute vorher geschlossen gehalten habe. Bei dieser Art die Gefässschatten sichtbar zu machen tritt aber etwas noch auffälliger hervor als bei jeder anderen, was mir zu beweisen scheint, dass die Unsichtbarkeit der Gefässschatten im gewöhnlichen Sehakte doch noch andere Gründe haben muss als die gemeiniglich angeführten, dass nämlich die Reizbarkeit der ausserhalb der Gefässschatten liegenden Netzhautelemente durch die stärkere Bestrahlung alsbald abgestumpft würde. Es müssten nämlich in Folge dieses Umstandes die beim ersten Augenaufschlag erscheinenden Gefässschatten dadurch verschwinden, dass die Helligkeit des Grundes zu dem Grade herabsänke der in den Schatten herrscht. Faktisch verschwinden aber die Schatten indem *ihre* Helligkeit auf den Grad der Helligkeit des Grundes rasch ansteigt. Es muss also ohne Zweifel noch ein bisher übersehener wirksamer Umstand aufgesucht werden.

1 Hermann, Grundr. d. Physiol. 5. Aufl. S. 366.

SIEBENTES CAPITEL.

Das vom Augenhintergrunde zurückkehrende Licht. (Augenspiegel).

Schon im vorigen Abschnitte hat sich gezeigt, dass das auf den Augenhintergrund fallende Licht keineswegs vom Pigmente der Chorioidea ganz verschluckt wird, da wir ein Flammenbildchen auf der Netzhaut als eine Lichtquelle wirken sahen, die den ganzen übrigen Augenhintergrund mit einem sehr merklichen Lichtschimmer überzieht. In der That giebt es auch gar kein schwarzes Pigment, welches das darauf fallende Licht vollständig absorbirt. Es muss also stets von einem durch helle Objekte stark beleuchteten Augenhintergrund eine sehr erhebliche Lichtmenge zurückstrahlen und es muss ohne Zweifel von diesem Lichte auch ein entsprechender Theil seinen Weg durch die Pupille wieder nach aussen nehmen. Wenn man dies bedenkt, könnte es paradox erscheinen, dass gleichwohl die Pupille jedes fremden Auges absolut schwarz erscheint, selbst wenn der Hintergrund dieses Auges ausgedehnte Bilder sehr heller Objekte enthält. Stellt man sich aber den Gang der vom Augenhintergrund zurückkehrenden Strahlen genauer vor, so ergiebt sich der Grund für die tiefe Schwärze der Pupille. In der That wird ja jedes von einem Punkte des Augengrundes ausgehende Strahlenbündel, welches die Pupille durchsetzt nach dem bekannten Gesetze der Reciprocität beim Strahlengange hin und her durch die brechenden Flächen in ein homocentrisches Strahlenbündel verwandelt, dessen Vereinigungspunkt auf dem durch den leuchtend gedachten Punkt des Augengrundes gezogenen Richtungsstrahl liegt, und zwar in der Entfernung für welche das Auge eingestellt ist. Bringt nun an diesen Ort der Beobachter sein Auge um das Strahlenbündel hineinfallen zu lassen, so kann ein solches unmöglich existiren, da sich ja an diesem Orte eine starke Lichtquelle befinden muss, wenn der betreffende Punkt im Hintergrund des beobachteten Auges stark beleuchtet und mithin selbst leuchtend sein soll. Man sieht also, dass sicher wenigstens in dem Falle, wo das beobachtete Auge auf die Entfernung eingerichtet ist, in welcher sich das beobachtende Auge befindet, diesem letzteren die Pupille des beobachteten absolut schwarz erscheinen muss aus dem einfachen Grunde, weil nur von solchen Punkten des be-

obachteten Augenhintergrundes Licht durch dessen Pupille ins beobachtende Auge gelangen könnte, die das Bild von der Pupille des letzteren aufnehmen, welches Bild aber eben dunkel ist. Auf die Lichtabsorption im Hintergrund des beobachteten Auges kommt es dabei gar nicht an. Von der Richtigkeit dieser Ueberlegung kann man sich leicht überzeugen, wenn man auf die Blendung des Okulares eines Fernrohres oder Mikroskopes ein Blättchen Papier legt, das farbig oder sogar weiss sein darf. Immer wird die Oeffnung der Okularlinse von einiger Entfernung aus gesehen schwarz erscheinen, wenn man dafür sorgt, dass nur durch diese und nicht von der anderen Seite des Okularrohres her Licht auf das Blättchen fallen kann. Man wird nämlich auch hier nur von solchen Punkten des Blättchens Licht erhalten können, die im Bereiche des (freilich nicht ganz scharfen) Bildes liegen, das die Okularlinse von der Pupille des eigenen Auges auf dem Blättchen entwirft und diese Stelle desselben ist eben unbeleuchtet.

Der soeben gegebenen Erklärung von der Dunkelheit einer beobachteten Pupille scheint die Thatsache zu widersprechen, dass die Pupille eines albinotischen Menschen oder Thieres nicht schwarz, sondern röthlich erscheint. Hiergegen hat aber Donders einen sehr schlagenden Versuch geltend gemacht, der darin besteht, dass man die Sklerotica und Cornea des albinotischen Auges mit einem undurchsichtigen Schirm bedeckt, in welchem ein rundes Loch etwas kleiner als die Pupille eingeschnitten ist, das gleichsam eine künstliche Pupille bildet. Diese erscheint dann ebenso schwarz wie die Pupille eines pigmentirten Auges. Dieser Versuch beweist, dass der Hintergrund des albinotischen Auges keineswegs desswegen hell erscheint weil ihm selbst das Pigment fehlt, sondern weil die Iris und die angrenzenden Theile der Chorioidea wegen Pigmentmangels durchscheinend sind, so dass durch sie hindurch ein diffuser Lichtschimmer im ganzen Auge verbreitet wird, der auch die Stelle des Hintergrundes beleuchtet, welche das Bild des beobachtenden Auges aufnimmt.

Indem man das an die Spitze dieser Erörterung gestellte Princip schärfer fasst, kann man den Satz aussprechen: In die Pupille eines beobachtenden Auges können nur von solchen Punkten des Hintergrundes eines beobachteten Auges Strahlen gelangen, auf welche auch umgekehrt von Punkten jener Pupille Strahlen fallen können. Der Inbegriff aller dieser Punkte ist aber das Bild — im weiteren Sinne des Wortes — der Pupille des Beobachters auf dem Grunde des beobachteten Auges. Ist dies Bild ein Zerstreuungsbild, so kön-

nen sehr wohl einzelne Theile desselben mit Theilen der Zerstreuungsbilder anderer Gegenstände zusammenfallen. Wenn also das beobachtete Auge nicht für die Entfernung angepasst ist, in welcher sich die (scheinbare) Pupille des Beobachters befindet, so kann es unter günstigen Umständen Stellen im Hintergrunde jenes Auges geben, die einerseits von einer starken Lichtquelle wirklich Licht empfangen andererseits aber in die Pupille des Beobachters wirklich Licht senden. Dieser letztere wird alsdann die beobachtete Pupille nicht ganz schwarz, sondern mit einem matten röthlichen Schimmer erfüllt sehen. Am leichtesten kann man die erforderlichen Bedingungen folgendermaassen herstellen. Es sei *T* Fig. 30 ein stark myopisches Auge, die Myopie kann nöthigenfalls durch willkürliche Akkommodation hergestellt werden. In einer die Sehweite dieses Auges weit übertreffenden Entfernung stellt man nun eine Lichtflamme davor auf. Ein Punkt *L* derselben wird alsdann auf der Netzhaut von *T* einen Zerstreuungskreis beleuchten dessen Durchmesser $\lambda_1 \lambda_2$ ist. Das beobachtende Auge *N* stellt sich nun dicht neben *L* und blendet sich durch einen Schirm *S* den störenden Schein von *L* weg. Dem Mittelpunkt der Pupille von *N* wird auf der Netzhaut von *T* ein Zerstreuungskreis $\nu_1 \nu_2$ entsprechen, dem die Strecke $\nu_1 \lambda_2$ mit dem Zerstreuungskreis von *L* gemeinsam ist. Jeder Punkt dieser Strecke kann also von *L* Licht empfangen und solches nach *N* senden. Z. B. empfängt der Punkt ν_1 auf einem Wege zwischen den ausgezogenen Linien Licht von *L* und sendet einen Strahl nach *N* auf dem Wege der punktirten Linie. In der That sieht unter diesen Umständen der Beobachter bei *N* die Pupille von *T* schwach röthlich schimmernd, wie zuerst Brücke bemerkt hat.

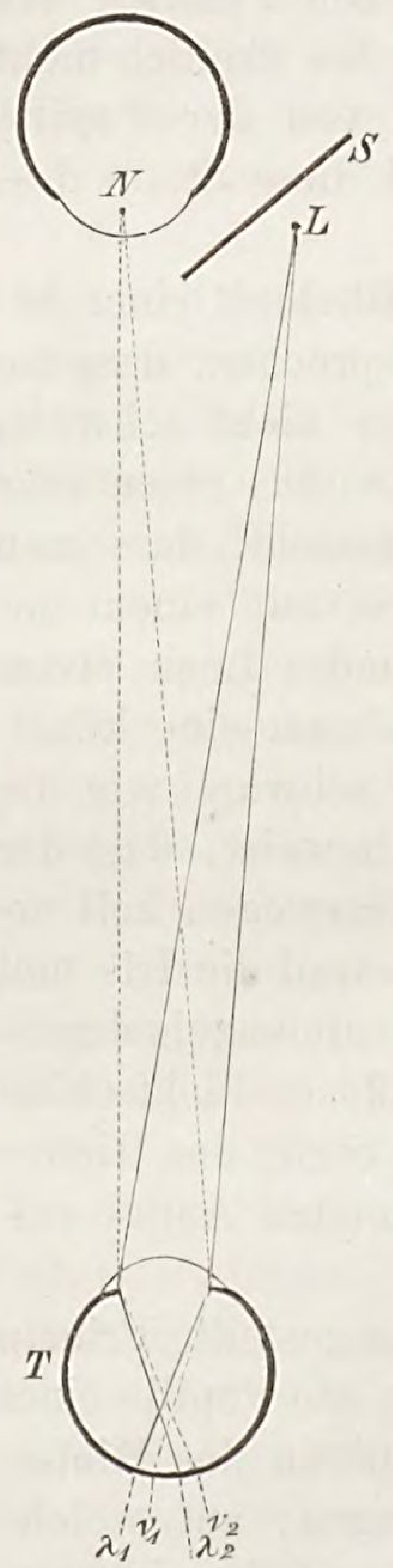


Fig 30.

Noch viel vollkommener und vom Anpassungszustand des beobachteten Auges ganz unabhängig kann man den Zweck erreichen, die Pupille leuchtend zu sehen durch einen sinnreichen Kunstgriff von Helmholtz. Man stellt nämlich wie Fig. 31 im Grundriss andeutet zwischen das beobachtende Auge *B* und das beobachtete *C* eine planparallele Glasplatte *S* schräg auf. Sie macht als Spiegel wirkend von der Licht-

flamme A ein Bild α. Die Strahlen der Flamme fallen also in das Auge C so hinein als kämen sie von α her, welche Richtung dieselbe ist wie die von B her. Sie werden also jedesfalls auch die Netzhautpunkte in C beleuchten, welche dem Zerstreuungsbilde der Pupille von B entsprechen. Dies Auge wird demnach durch die Platte S hindurch die Pupille von C hell sehen. War einmal die Möglichkeit gegeben vom Hintergrunde eines Auges wirksame Lichtstrahlen in das eigene Auge zu leiten, so konnte man auch den Plan fassen, jenen Augenhintergrund deutlich zu sehen. Eine Vorrichtung, welche dies ermöglicht, nennt man einen „Augenspiegel". Die erste solche ist von Helmholtz erfunden, welcher dadurch eine neue Aera der Augenheilkunde heraufgeführt hat.

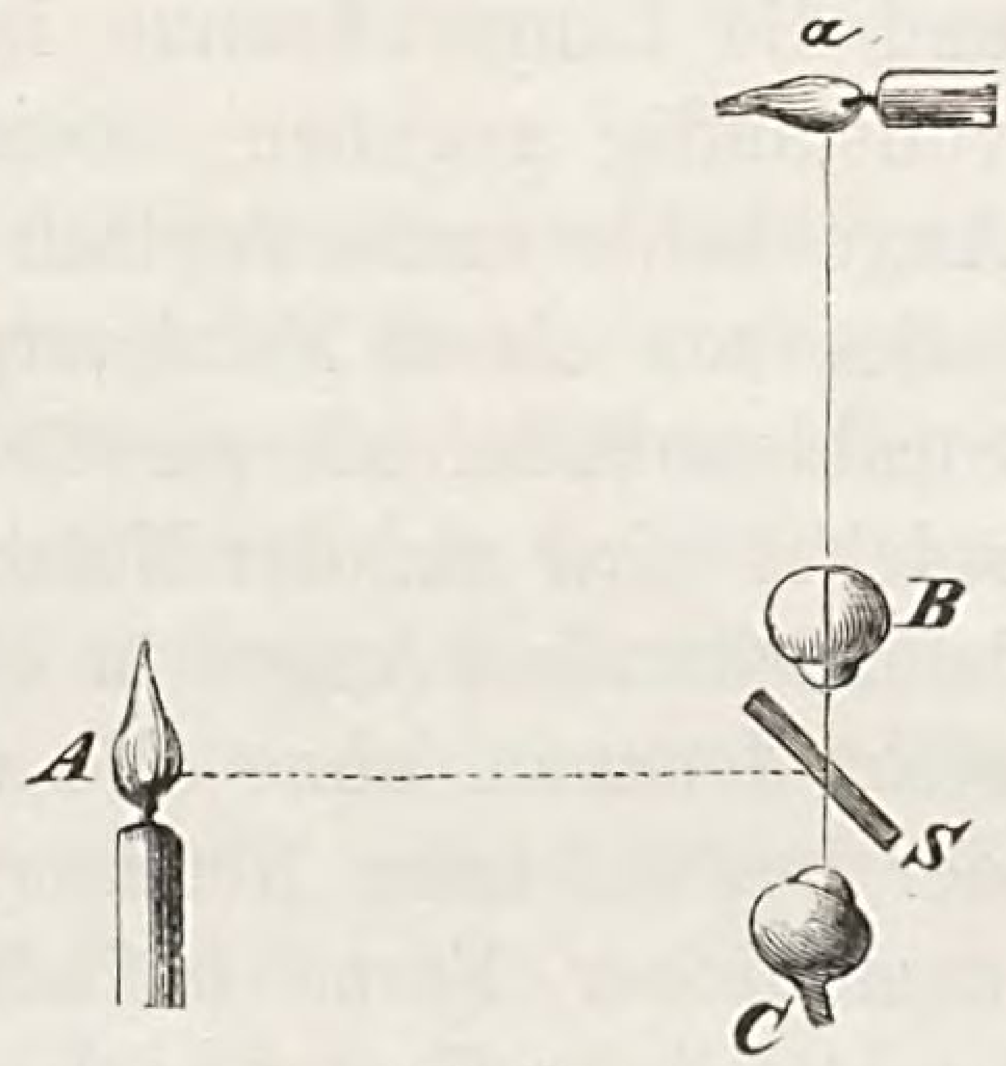


Fig. 31.

Stellt man sich die richtige Stelle vom Hintergrunde des beobachteten Auges irgendwie leuchtend gemacht vor, so kommt es um sie deutlich sichtbar zu machen nur noch darauf an, dass die von den einzelnen Punkten dieser Stelle ausgehenden Strahlenbündel nach ihrem Austritt aus dem Auge so gebrochen werden, dass ihre Strahlen oder deren Richtungen sich in Punkten schneiden, welche in der deutlichen Sehweite vom beobachtenden Auge liegen. Diesen Zweck kann man nun auf zwei Wegen zu erreichen suchen. Entweder man stellt das beobachtende Auge nahe an das beobachtete und sucht die aus dem letzteren hervortretenden Strahlenbündel (wenn sie es nicht schon sind) in divergente zu verwandeln, deren bloss virtuelle Schnittpunkte hinter dem beobachteten Auge in der deutlichen Sehweite des beobachtenden liegen. Oder zweitens man stellt das beobachtende Auge weiter entfernt vom beobachteten auf und bringt die aus diesem ausfahrenden Strahlenbündel sehr rasch zur reellen Convergenz, so dass die Schnittpunkte vom beobachtenden Auge in dessen deutlicher Sehweite liegen, das letztere kann dabei nöthigesfalls noch mit einer seine Sehweite verkürzenden Sammellinse versehen werden.

Jede dieser beiden Beobachtungsarten kann man kombiniren mit jeder der beiden Beleuchtungsarten, und erhält so 4 Grundformen des Augenspiegels, nämlich : 1. Beleuchtung mittels der durchsichtigen spiegelnden Platte, Beobachtung im virtuellen Bilde (die ursprüngliche Form des Augenspiegels von Helmholtz). 2. Beleuchtung ebenso,

Beobachtung im reellen Bilde (Augenspiegel von Engelhard[1]). 3. Beleuchtung durch theilweise Deckung des Zerstreuungsbildes von der Pupille des Beobachters mit dem Zerstreuungsbilde von einer starken Lichtquelle im beobachteten Auge, Beobachtung im virtuellen Bilde (Augenspiegel von Donders und van Trigt, Coccius, Liebreich etc.). 4. Beleuchtung nach demselben Princip, Beobachtung im reellen Bilde (Augenspiegel von Ruete, Liebreich etc.).

Die erste dieser 4 Grundformen ist durch die schräge Glasplatte und die Lampenflamme in der Anordnung von Fig. 31 schon ganz vollständig gegeben, wenn das beobachtete und das beobachtende Auge beide emmetropisch sind. In der That in diesem Falle geht jedes von einem Netzhautpunkte des beobachteten Auges ausgesandte Strahlenbündel als parallelstrahliges aus demselben hervor und ein solches wird auf der Netzhaut des ebenfalls emmetropisch gedachten beobachtenden Auges in einem Punkte wieder vereinigt. Das letztere sieht demnach ohne alle weitere Hülfsmittel die beleuchteten Theile der beobachteten Netzhaut deutlich und zwar als ein scheinbar in unendlicher Ferne befindliches Objekt, in welchem oben, unten, rechts, links liegt was in Wirklichkeit ebenso liegt. Das beobachtende Auge sieht also ein aufrechtes virtuelles Bild der Netzhaut. Da es in unendlicher Ferne liegt ist es auch unendlich gross. Der Vergrösserungscoefficient ist demnach hier nach einem anderen Princip zu berechnen, wie weiter unten gezeigt werden soll.

Der Beobachter sieht auch dann ohne jede künstliche dioptrische Vorrichtung die Netzhaut eines dicht vor ihm befindlichen Auges deutlich, wenn das beobachtende Auge in ungefähr demselben Grade myopisch ist, in welchem das beobachtete hypermetropisch ist oder umgekehrt. In jedem andern Falle bedarf aber das beobachtende Auge noch eines künstlichen dioptrischen Apparates, um die beobachtete Netzhaut deutlich zu sehen, und zwar besteht derselbe einfach aus einer Konkavlinse, wenn beide Augen myopisch sind oder das eine wenigstens stärker myopisch ist als das andere hypermetropisch, mit einem Worte, wenn die Summe der Refractionswerthe beider Augen positiv ist. Um dies anschaulich zu machen, ist in Fig. 32 ein Meridianschnitt des beobachteten Auges bei A dargestellt, dasselbe sei auf die Entfernung des Punktes b, die wir selbst mit b bezeichnen wollen, eingestellt, dann wird das von einem Punkte a seiner Netzhaut ausgesandte Strahlenbündel nach b konvergirend austreten und würde auf der Netzhaut des für die Entfernung des Punktes

[1] Engelhard, Eine neue Form des Augenspiegels. München 1878.

d (die selbst mit d in der Rechnung bezeichnet werden soll) eingerichtet gedachten beobachtenden Auges einen Zerstreuungskreis beleuchten. Soll nun dies sowie die von andern a benachbarten Netz-

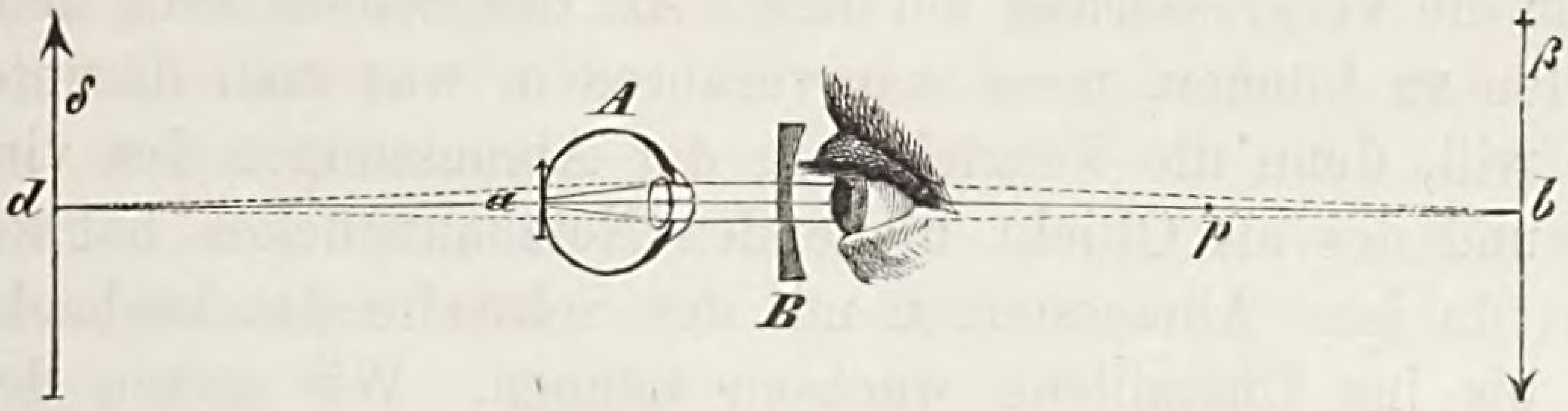


Fig. 32.

hautpunkten ausgesandten Strahlenbündel auf der Netzhaut des Beobachters punktuell vereinigt werden, so muss jedes dieser konvergenten Bündel in ein divergentes verwandelt werden und zwar von solcher Divergenz, als kämen sie aus der Entfernung d. Das kann aber eine Zerstreuungslinse B bewirken. Zu diesem Ende muss ihre (negative) Brennweite so gewählt sein, dass sie von dem virtuellen Objekte bei b ein virtuelles Bild bei d entwirft. Der Abstand des virtuellen Objektes bei b von der Linse ist aber $(b - e_1)$, wenn e_1 die Entfernung der Linse vom beobachteten Auge ist. Der gewünschte Abstand des virtuellen Bildes bei d von der Linse ist $d - e_2$, wenn e_2 die Entfernung zwischen der Linse und dem beobachtenden Auge ist. Eine Linse aber, welche von einem um $b - e_1$ von ihr abstehenden virtuellen Objekte ein um $d - e_2$ von ihr abstehendes virtuelles Bild machen soll, muss eine Brennweite x haben, die der Gleichung

$$-\frac{1}{b - e_1} - \frac{1}{d - e_2} = \frac{1}{x}$$

geneigt, woraus sich für x natürlich ein negativer Werth ergiebt, d. h. es ist eine Zerstreuungslinse erforderlich. Gewöhnlich sind b und d viel grösser als e_1 und e_2, so dass man diese Summanden in den Nennern ganz weglassen kann und sich x aus der einfacheren Gleichung

$$-\frac{1}{b} - \frac{1}{d} = \frac{1}{x}$$

berechnet. Diese kann in Worten ausgesprochen werden: der reciproke Werth der Brennweite der zur Beobachtung erforderlichen Zerstreuungslinse ist die negativ genommene Summe der beiden Brüche, welche die Refraktionszustände des beobachteten und des beobachtenden Auges messen. Kennt also der Beobachter seinen eigenen Refractionswerth und hat er empirisch die Linse herausgefunden, welche er zur Beobachtung eines bestimmten Auges nöthig hat, so braucht er nur vom positiv genommenen reciproken Werthe der Linsenbrennweite seinen eigenen Refraktionswerth abzuziehen,

um den Refraktionswerth des beobachteten Auges zu erhalten. Dies ist die S. 76 erwähnte Methode, den Refraktionswerth eines Auges ohne subjektive Sehprüfungen zu bestimmen.

Um die Vergrösserung bei dieser Art der Beobachtung numerisch darstellen zu können, muss man verabreden, was man darunter verstehen will, denn die Vergleichung der Abmessungen des virtuellen Bildes und des als Objekt dienenden Netzhautstückes hat kein Interesse, da jene Abmessungen mit der Sehweite des beobachtenden Auges bis ins Unendliche wachsen können. Wir setzen demnach fest, unter der Vergrösserungszahl soll hier wie bei mikroskopischen Bildern verstanden werden, wievielmal grösser der Sehwinkel ist, unter welchem das virtuelle Bild erscheint, als der Sehwinkel, unter welchem das gesehene Netzhautstück in 8 par. Zoll Entfernung versetzt erscheinen würde. Sei nun der Pfeil α der Durchmesser des gesehenen Netzhautstückes und der Pfeil bei b das reelle Bild, welches durch den brechenden Apparat des beobachteten Auges davon aussen entworfen würde. Seine Länge β wird $= \frac{b}{\varkappa}\alpha$ sein, wenn mit $\varkappa$ die Entfernung des Knotenpunktes von der Netzhaut im Auge A bezeichnet wird. Die Linse B entwirft nun von dem für ihren Standpunkt virtuellen Objekte bei b ein virtuelles Bild bei d, dessen Durchmesser δ sich berechnet

$$= \frac{d - e_2}{b - e_1} \cdot \frac{b}{\varkappa}\alpha.$$

Diese Grösse durch d dividirt oder

$$\frac{d - e_1}{d} \cdot \frac{b}{b - e_2} \cdot \frac{\alpha}{\varkappa},$$

ist aber die doppelte Tangente des halben Gesichtswinkels, unter welchem das schliesslich virtuelle Bild dem beobachtenden Auge erscheint, oder da es sich hier nur um kleine Gesichtswinkel handeln kann, geradezu das Bogenmaass dieses Gesichtswinkels. Ebenso ist das Bogenmaass des Winkels, unter welchem der Durchmesser $\alpha =$ des Netzhautstückchens in eine Entfernung von 8 Zoll frei vor das Auge gesetzt erscheinen wird $\frac{\alpha}{8}$ oder wenn man in Millimetern messen will $\frac{\alpha}{216}$. Die Vergrösserungszahl wäre also der Verabredung entsprechend

$$= \frac{d - e_2}{d} \cdot \frac{b}{b - e_1} \cdot \frac{\alpha}{\varkappa} : \frac{\alpha}{216} = \frac{d - e_2}{d} \cdot \frac{b}{b - e_1} \cdot \frac{216}{\varkappa}$$

oder wenn wir wieder e_2 und e_1 gegen d und b vernachlässigen $=$

$\frac{216}{\varkappa}$. Setzen wir nun $\varkappa$ für ein normales Auge in runder Zahl = 15 mm., so ergiebt sich die Vergrösserung der Netzhaut bei Beobachtung aus unmittelbarer Nähe im virtuellen aufrechten Bilde als eine etwa 14,4fache. Diese Zahl ist, wie man sieht, unabhängig von den Refraktionszuständen der beiden Augen, nur müssen die beiden Sehweiten viel grösser als der Abstand zwischen beiden Augen sein, welche Bedingung immer erfüllt ist, wenn nicht ein oder beide Augen sehr myopisch sind.

Eine theoretisch sehr bemerkenswerthe Eigenthümlichkeit des HELMHOLTZ'schen Augenspiegels besteht darin, dass man mit demselben im beobachteten Auge das deutliche Netzhautbild der beleuchtenden Flamme sehen kann, denn man kann ja diese in solcher Entfernung aufstellen, dass von ihrem Spiegelbild ein deutliches Bild auf der Netzhaut des beobachteten Auges entsteht, welches dann vom beobachteten Auge 14mal vergrössert deutlich gesehen wird.

Beim HELMHOLTZ'schen Augenspiegel wie bei der Beobachtungsart aus der Nähe in aufrechtem virtuellen Bilde überhaupt ist das zu übersehende Netzhautstück immer sehr klein. Es ist nämlich, wie gezeigt wurde, immer das Zerstreuungsbild der Pupille des beobachtenden Auges im beobachteten. Dies ist aber, wie man leicht sieht, klein, wenn beide Augen einander nahe sind und nur eine Zerstreuungslinse dazwischen steht.

Bei allen ophthalmoskopischen Untersuchungen pflegen die Hornhautreflexe der unentbehrlichen starken Lichtquelle sehr störend zu sein. Um diesen Uebelstand möglichst zu vermindern und um die Beleuchtungsstärke zu vergrössern, hat HELMHOLTZ bei Construction seines Augenspiegels einen sinnreichen Kunstgriff angewendet. Er nimmt nämlich zur Beleuchtung nicht eine, sondern drei dicht zusammengelegte parallele Glasplatten die drei fast zusammenfallende beleuchtende Bilder geben. Stehen sie aber unter einem gewissen Winkel zu den von der Flamme kommenden Strahlen, so wird das reflektirte Licht nahezu vollständig polarisirt sein. Das an der Hornhaut reflektirte Licht wird diese Polarisation behalten und folglich auf dem Wege zum beobachtenden Auge beim Durchgange durch die Platten sehr geschwächt werden. Das von der beobachteten Netzhaut zurückkehrende Licht hat dagegen durch die diffuse Zerstreuung die Polarisation verloren und wird also beim Durchgang durch die Platten nur soweit geschwächt, als es die gewöhnliche Absorption bedingt.

Trotz dieses Kunstgriffes bleibt die Lichtstärke des schliesslichen

Bildes bei Beleuchtung mit durchsichtigen Glasplatten immer gering. Zu praktischen Zwecken pflegt man daher die Beobachtung im aufrechten Bilde aus der Nähe zu kombiniren mit dem anderen Princip der Beleuchtung. Um zu verstehen, wie dies zweckmässig auszuführen ist, stelle man sich zunächst vor, dass ein Hohlspiegel von dem Orte aus, wohin er das Bild einer Flamme wirft, gesehen, selbst wie eine stark leuchtende Fläche erscheint, da ja von jedem Punkte derselben ein Strahlenbündel ausgeht, das nach den einzelnen Punkten des Bildes divergirt. Steht also hier die Pupille eines Auges, die kleiner als das Flammenbild ist, so wird sie von jedem Punkte des Spiegels her von einem Strahlenkegel erfüllt. Dasselbe gilt annähernd auch dann noch, wenn das Auge zwischen dem Flammenbilde und dem Spiegel steht. Stellt man also einen Hohlspiegel an die Stelle der Glasplatte schräg vor das beobachtete Auge und die Lampenflamme an die geeignete Stelle zur Seite, so kann der Hohlspiegel selbst als leuchtende Fläche angesehen werden und er wird ein grosses Feld auf der Netzhaut stark beleuchten. Zum Zwecke der Beobachtung muss nun freilich der undurchsichtige Hohlspiegel ein kleines Loch in der Mitte haben, von welchem kein Licht ausgehen kann, da aber der Rand dieses Loches ein Zerstreuungsbild im beobachteten Auge entwirft, so wird die dadurch entstehende Lücke in der Beleuchtung seiner Netzhaut keine vollständige sein, sondern nur an einer Stelle eine Schwächung derselben bedingen. Eine Idee von der Lichtvertheilung in dem Zerstreuungsbilde des Loches im Spiegel *ab* kann Fig. 33 geben, wo der radial gemessene Abstand

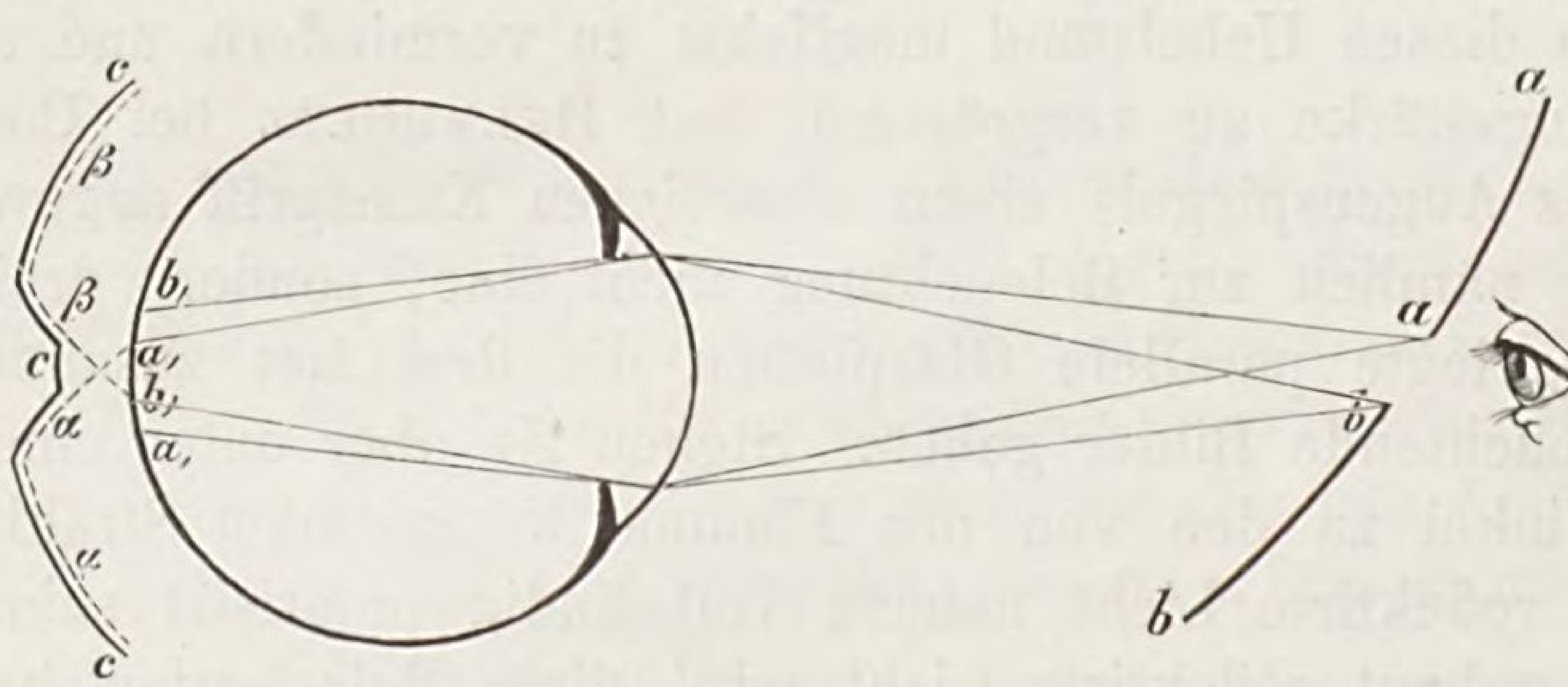


Fig. 33.

der ausgezogenen Kurve *cc* von der Umfangslinie des Augapfels ungefähr die Beleuchtungsstärke im betreffenden Punkte der Netzhaut misst. Der radial gemessene Abstand der punktirten Kurve $_{,}\beta\beta$ stellt nämlich die vom Spiegeltheil *bb* herrührende Beleuchtungsstärke dar und ebenso der Abstand der punktirten Kurve $_{,}\alpha\alpha$ die vom Spiegeltheil *aa* herrührende Beleuchtungsstärke, die radialen Ordinaten der

Kurve *ccc* sind aber die Summen der Ordinaten der punktirten Kurven. Eine direkte subjektive Anschauung vom Umfang und von der Stärke der Beleuchtung an den verschiedenen Stellen erhält man, wenn man das eigene Auge an die Stelle des beobachteten vor den Spiegel und die Lichtflamme an ihren Ort bringt. Man sieht leicht, dass die Lücke in der vollen Beleuchtung um so heller wird, je weiter die Pupille des beobachteten Auges ist. Da andererseits auch das Zerstreuungsbild der Pupille des Beobachters im beobachteten Auge oder das vom Beobachter zu überschauende Gesichtsfeld von der Pupillenweite des beobachteten Auges abhängt, so ist es für die Beobachtung aus der Nähe im virtuellen Bilde wesentlich jene Pupillenweite so gross als möglich zu machen, was durch Atropineinträufelung geschehen kann.

Statt des durchbohrten Hohlspiegels kann auch ein durchbohrter Planspiegel dienen, wenn zwischen ihn und die Lichtflamme eine Konvexlinse gesetzt wird. Verschiedene Kombinationen der soeben beschriebenen Beleuchtungsapparate mit den erforderlichen Zerstreuungslinsen in verschiedenen Fassungen mehr oder weniger fest vereinigt bilden die Augenspiegel von Coccius, Donders & van Trigt und Liebreich.

Um den Augengrund im reellen Bilde zu beobachten, brauchte man — so scheint es wenigstens — für mehr oder weniger myopische Augen nur die in Fig. 30 dargestellte Anordnung zu verwirklichen und den Abstand der beiden Augen gleich der Summe ihrer Sehweiten zu machen. In der That muss ja in der Sehweite des beobachteten Auges vom beleuchteten Theile seines Grundes ein reelles umgekehrtes Bild entstehen, was alsdann für den Beobachter in seiner Sehweite läge. Man sieht aber leicht, dass hier die Lichtstärke sehr gering sein und das übersehene Gesichtsfeld fast auf einen Punkt zusammenschrumpfen würde.

Um zunächst diesem letzteren Uebelstande zu begegnen, setzt man nahe vor das beobachtete Auge *A* (Fig. 34) eine starke Konvexlinse *B*, deren Brennweite ungefähr gleich ihrem Abstande vom Knotenpunkte dieses Auges ist. Stellt sich jetzt das beobachtende Auge bei *C* in wenigen Decimeter Entfernung von der Linse auf, so wird

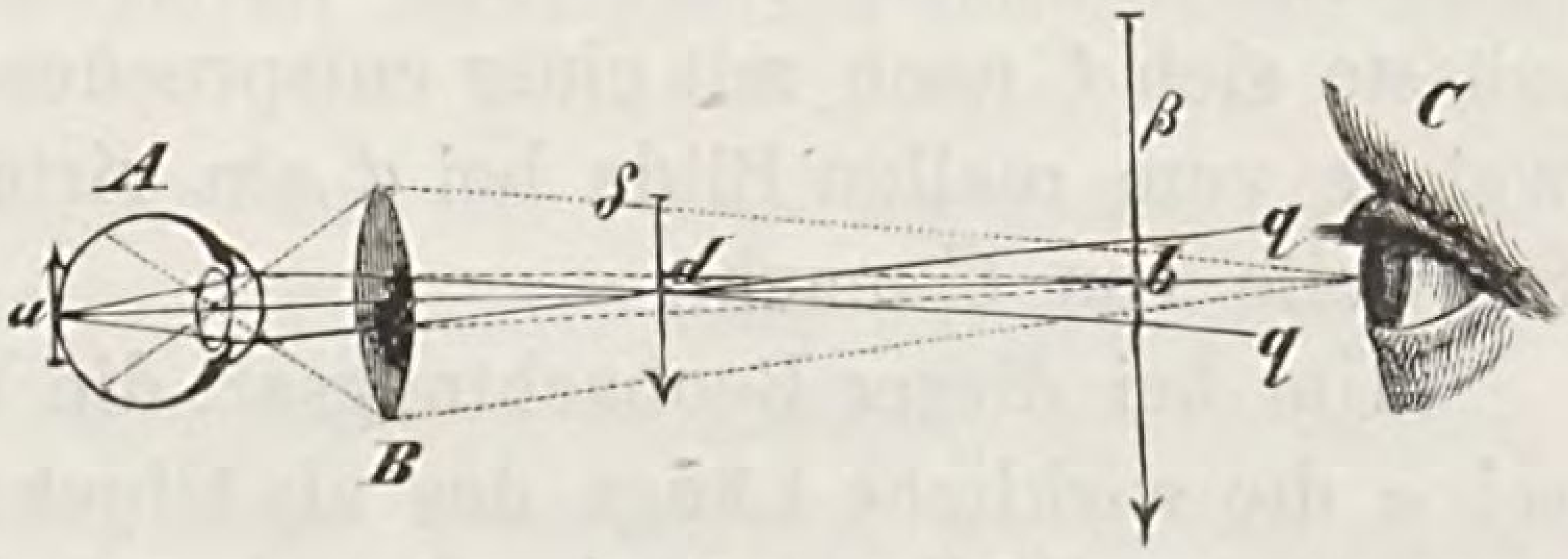


Fig. 34.

sein Gesichtsfeld im Auge *A* sehr gross. Denkt man sich nämlich jetzt ein Strahlenbündel vom Mittelpunkte der Pupille des Auges *C*

ausgehend, so würde dasselbe durch die Linse *B* in einem Punkte vereinigt, der nahe am Knotenpunkt von *A* liegt, seine Strahlen gingen also durch das Auge *A* fast ungebrochen und würden auf seiner Netzhaut ein sehr grosses Feld beleuchten. Die beiden äussersten Strahlen dieses Bündels, welche durch den Rand der Linse gehen, sind in der Figur als punktirte Linien zu verfolgen. Dieses ganze Feld ist aber das von *C* aus zu übersehende Gesichtsfeld, denn auf jedem Wege, auf welchem ein Strahl von der Pupille des Auges *C* auf die Netzhaut von *A* gelangen kann, auf dem kann auch ein Strahl von der Netzhaut des Auges *A* in die Pupille von *C* fallen. Es verdient noch bemerkt zu werden, dass jetzt das Gesichtsfeld gar nicht von dem Pupillenrande des Auges *A* begrenzt, also auch nicht von ihrer Weite abhängig ist. Es ist vom Linsenrande begrenzt, wie aus der Konstruktion ersichtlich, und hängt daher von ihrer Oeffnung allein ab.

Da die Pupille des Beobachters in Wirklichkeit doch nicht ein blosser Punkt ist, so ist das Gesichtsfeld eigentlich noch ein wenig grösser als aus dieser Konstruktion hervorgeht.

Die Linse *B* bewirkt aber zugleich noch etwas Anderes. Ein vom Netzhautpunkte *a* des Auges *A* ausgehendes Strahlenbündel würde offenbar in der Sehweite dieses Auges, die *b* heissen mag, wieder vereinigt werden. Der Punkt dieser Vereinigung sei der Punkt *b* der Figur. Vermöge der Brechung, die das Bündel in *B* erleidet, wird es aber schon früher, etwa in *d*, vereinigt. Hier kommt also ein reelles Bild des Punktes *a* zu Stande. Ebenso entstehen von den *a* benachbarten Punkten der Netzhaut von *A*, wenn sie leuchtend sind, reelle Bilder in der Nähe von *d* und stellen hier in einer zur Axe des Auges *A* senkrechten Ebene ein verkehrtes reelles Bild der ganzen um *a* herum gelegenen Netzhautgegend dar. Dies Bild kann nun von *C* aus deutlich gesehen werden, wenn der Abstand des Punktes *d* von *C*, den wir mit *d* bezeichnen wollen, die deutliche Sehweite von *C* ist. Sollte diese grösser als *d* sein, so müsste sich *C* noch mit einer entsprechenden Sammellinse bewaffnen, welche vom reellen Bilde bei *d* ein virtuelles Bild in der deutlichen Sehweite von *C* macht.

Um bei dieser Beobachtungsart die Vergrösserung zu berechnen, sei α die wirkliche Länge des als Objekt dienenden Netzhautstückes von *A* (des Pfeiles bei *a*). Davon würde bei *b* durch die brechenden Medien von *A* ein reelles Bild entworfen, dessen Länge $\beta =$

1 Die Sehweite *b* mag hier vom Knotenpunkte aus statt vom Hauptpunkte aus gemessen sein.

$\frac{b}{\varkappa}\alpha$ wäre, wenn wir wie oben mit $\varkappa$ den Abstand zwischen Netzhaut und dem Knotenpunkte von A bezeichnen. Dieses reelle Bild dient nun der Linse B als virtuelles Objekt. Setzen wir die Linse, wie oben angenommen, um ihre Brennweite f abstehend vom Knotenpunkte des beobachteten Auges abstehend voraus, so ist der Abstand x des reellen Bildes, das sie von dem um $b-f$ von ihr abstehenden virtuellen Objekte entwirft, zu berechnen aus der Gleichung

$$\frac{1}{x}+\frac{1}{-(b-f)}=\frac{1}{f} \text{ oder } x=\frac{f(b-f)}{b}.$$

Die Länge δ dieses Bildes ist also

$$\frac{f(b-f)}{b}\cdot\frac{1}{b}\cdot\frac{b}{\varkappa}\alpha=\frac{f(b-f)}{b}\cdot\frac{\alpha}{\varkappa}.$$

Da aber gemeiniglich Linsen von kurzer Brennweite angewandt werden, also f meist klein gegen b ist, so wird δ nahezu

$$\delta=\frac{f}{\varkappa}\alpha$$

sein. Da $\varkappa$ ungefähr 15 mm. beträgt, wird also für $f=30$ mm., $\delta=2\alpha$, für $f=45$ mm. $\delta=3\alpha$, für $f=60$ mm. $\delta=4\alpha$ sein, d. h. das schliesslich sichtbare reelle Bild des Netzhautstückes ist in Wirklichkeit 2-, 3- und 4mal so gross als das Objekt, wenn eine Linse von 30, 45 und 60 mm. Brennweite vor das beobachtete Auge gesetzt wird. Wollte man die Vergrösserungszahl hier nach demselben Principe berechnen wie oben S. 132, so hätte man den Gesichtswinkel, unter welchem δ von C aus erscheint, nämlich

$$\frac{\delta}{d} \text{ oder } \frac{f\alpha}{\varkappa d}$$

zu dividiren durch den Gesichtswinkel, unter welchem α in 8 par. Zoll oder 216 mm. Entfernung erscheint, d. h. $\frac{\alpha}{216}$, dies giebt $\frac{f\,.\,216}{\varkappa\,.\,d}$ Wäre die Sehweite d des Auges C selbst gerade 216 mm., so stimmt die so berechnete Vergrösserungszahl natürlich mit der reellen Vergrösserung überein.

Um für diese Beobachtungsart aus der Ferne im verkehrten reellen Bilde zu beleuchten, kann man wieder eine Glasplatte schräg vor C setzen und an geeigneter Stelle eine Lampe, deren Reflex durch B in das Auge A fällt. Diese Combination ist mit einigen Besonderheiten verwirklicht in dem Augenspiegel von ENGELHARDT.

Wenn man zur Beleuchtung den durchbohrten Hohlspiegel verwendet, so wird er dicht vor C so gehalten, dass er das reelle Bild einer grossen und hellen Lampenflamme gerade auf die Linse B wirft.

Füllt dies die ganze Linse B aus, so erscheint für den Standpunkt von A die ganze Linse B wie eine stark leuchtende Scheibe, welche also stets ein hinlänglich grosses Zerstreuungsbild auf der Netzhaut von A erleuchtet. Darin ist auch kaum etwas von einer Lücke, dem Loche des Spiegels entsprechend, wahrzunehmen. Davon kann man sich subjektiv leicht überzeugen, wenn man alles wie zur Beobachtung aufstellt und sein eigenes Auge an die Stelle von A bringt. Aber auch durch Konstruktion des Strahlenganges von der Lampenflamme zum Spiegel und durch die Linse ins Auge kann leicht gezeigt werden, dass keine störend wirkende Lücke in der Beleuchtung zu Stande kommt.

ZWEITER THEIL.

DIE LEHRE VON DER LICHTEMPFINDUNG.

VON

PROF. DR. A. FICK IN WÜRZBURG.

EINLEITUNG.

Die Strahlen, deren Gang durch die brechenden Medien des Auges wir im vorigen Abschnitte verfolgt haben, fallen zuletzt auf die im Hintergrunde des Auges ausgebreiteten Sehnervenenden, und bilden deren adäquaten Reiz. Es ist bekannt, dass auf die eigentliche Nervensubstanz strahlend fortgepflanzte Aetheroscillationen gar nicht oder nur dann reizend wirken, wenn sie dieselben in solcher Intensität treffen, dass dadurch eine für das Nervengewebe fast tödtliche Erwärmung hervorgebracht wird. Das Auge wird dagegen, wie die tägliche Erfahrung lehrt, von äusserst schwachen Strahlungen sehr merklich erregt. Solche aber, wie sie z. B. von einer durch schwachen Mondschein beleuchteten Fläche ausgesandt werden, können ganz sicher ein eigentliches Nervenelement, sei es Faser oder Zelle, nicht reizen. Man muss daher nothwendig annehmen, dass an den Enden der Sehnervenfasern besondere Apparate angebracht sind. Sie können nicht aus eigentlicher Nervensubstanz bestehen, deren molekulares Gleichgewicht durch so schwache Anstösse eben noch nicht in dem zum Entstehen einer Erregungswelle erforderlichen Grade gestört wird. Sie müssen vielmehr aus einem Stoffe bestehen, welcher wie etwa die photochemisch empfindlichen Substanzen die Eigenschaft haben, dass sie treffende Aetherschwingungen darin chemische Kräfte auslösen, welche eine weit grössere Arbeit zu leisten vermögen als die auslösenden Aetherschwingungen. Diese grössere Arbeit kann dann zur Erregung der mit diesen Apparaten zusammenhängenden Nervenenden verwandt werden. Nur auf diese Art kann die Erregung der verhältnissmässig trägen Nervensubstanz durch so märchenhaft ge-

ringfügige Arbeit, wie sie der schwächste noch sichtbare Lichtstrahl zu leisten im Stande ist, erklärt werden. Beiläufig bemerkt, giebt die enorme Reizbarkeit anderer Sinnesapparate zu analogen Folgerungen Anlass.

Es entsteht nun die Frage, welches von den zahlreichen unter dem Mikroskope unterscheidbaren Gewebselementen der Netzhaut mit der grössten Wahrscheinlichkeit als dasjenige zu betrachten ist, in welchem jene Auslösung anderer Kräfte durch die Arbeit der Aetheroscillationen stattfindet. Um sie entscheiden zu können, müssen wir uns den anatomischen Bau der Netzhaut genau vorstellen.

ERSTES CAPITEL.

Bau der Netzhaut.

Nachdem der Sehnerv die Sklera und Chorioidea durchbohrt hat, breiten sich seine Faserbündel nach allen Seiten in der tunica retina aus, die daher zusammengesetzt ist aus den Fasern dieses Nerven, ihren Anhangsgebilden und einem bindegewebigen Stroma, in welches die eigentlich nervösen Elemente eingelagert sind. Da die Ausbreitung der Sehnervenfasern auf der inneren Seite der Netzhaut liegt und die übrigen Elemente nach aussen davon, so müssen diese Elemente natürlich an der Durchtrittstelle des Sehnerven selbst fehlen, der die übrigen Schichten der Netzhaut gewissermaassen auch durchbohrt. Indem an dieser Stelle die Nervenfasern hervorquellen, entsteht daselbst eine Hervorragung nach innen, die sogenannte papilla nervi optici, welche ungefähr in der Mitte eine kleine trichterförmige Einsenkung zeigt, entsprechend dem allseitigen Auseinanderbiegen der Faserbündel. Hier treten auch die vasa centralia retinae an die innere Oberfläche der Netzhaut. Die Verzweigungen der Gefässe schliessen sich einzelnen Faserzügen der Sehnervenausbreitung an.

Die verschiedenartigen Gewebselemente der Netzhaut sind im allgemeinen in Schichten geordnet, deren sich auf einem zur Flächenausbreitung senkrechten Schnitte 10 deutlich unterscheiden lassen.

In Fig. 35 ist ein solcher Schnitt schematisch dargestellt und die einzelnen Schichten durch Zahlen bezeichnet. Die Reihenfolge der Zahlen von unten nach oben fortschreitend, entspricht der Fort-

schreitung von innen nach aussen, d. h. von der Glaskörperseite zur Chorioidealseite, so dass man unten den Glaskörper, oben die Chorioidea sich zu denken hat. Die übliche Benennung der Schichten ist folgende:

1. Membrana limitans interna.
2. Nervenfaserschicht.
3. Ganglienzellenschicht.
4. Innere granulirte oder molekuläre Schicht.
5. Innere Körnerschicht.
6. Aeussere granulirte oder Zwischenkörnerschicht.
7. Aeussere Körnerschicht.
8. Membrana limitans externa.
9. Stäbchen- und Zapfenschicht.
10. Pigmentepithel.

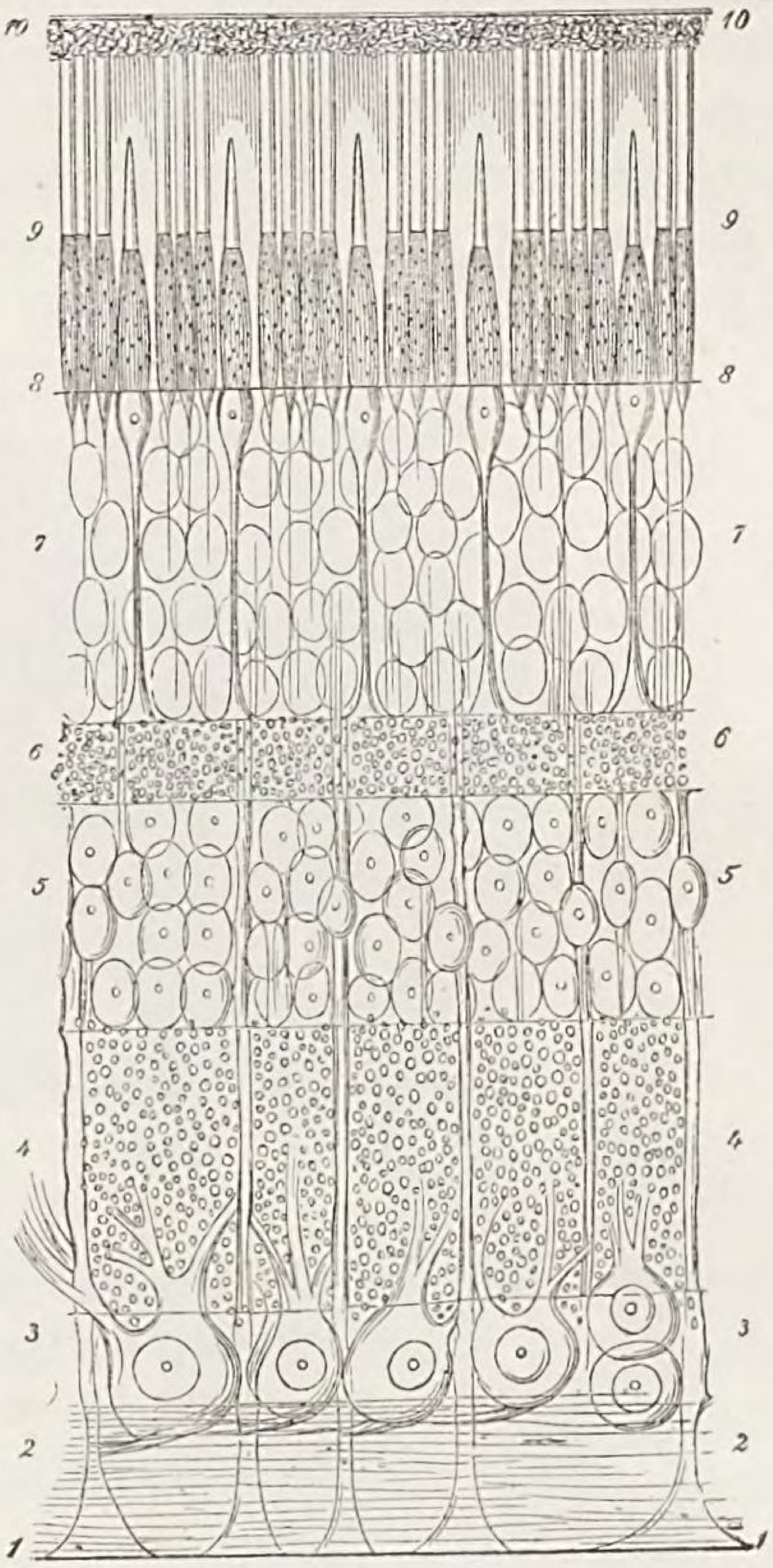


Fig. 35.

Wie in der Zeichnung zu sehen, ist die ganze Dicke der Netzhaut von zahlreichen radialen Fasern durchzogen. Diese nach ihrem Entdecker Müller'sche genannten Fasern hält man gegenwärtig zum grossen Theil für Elemente der stützenden Bindesubstanz, zu welcher ausserdem unzweifelhaft die Membrana limitans externa und interna gehört. Die limitans interna stellt sich bei genauerer Betrachtung dar als gebildet durch trichterförmige Ausbreitung radialer Fasern (wie auch in der Figur angedeutet ist), die an den Rändern miteinander verschmelzen. Die limitans interna wäre demnach keine ununterbrochene Schicht, sondern eher einem filigranartigen Gitterwerk zu vergleichen. Ein ebensolches Gitterwerk stellt auch die limitans externa dar, durch dessen Lücken die weiter unten zu beschreibenden Stäbchen und Zapfen durchtreten.

Die ganze stützende Bindesubstanz der Netzhaut kann man ansehen als ein schwammartiges Gewebe, in dessen Lücken die nervösen Elemente eingelagert sind. In der Faser-, Zellen- inneren und äusseren Körnerschicht sind die Lücken verhältnissmässig gross und

die Substanz reducirt sich auf einzelne radial gestellte Bälkchen — eben die schon erwähnten Radialfasern. In den beiden granulirten Schichten (4 und 6 Fig. 35) herrscht die Bindesubstanz mehr vor, die Lücken sind kleiner. Von diesem ganzen in zwei Schichten dichteren, in den übrigen spärlicheren und mehr groblöcherigen Schwammgewebe wäre demnach die membrana limitans interna die innere, die limitans externa die äussere Grenze. Ueber die letztere hinaus erstrecken sich jedoch noch radiale Fortsätze der Bindesubstanz zwischen die Elemente der äussersten Netzhautschicht. Eine Vorstellung von dieser Auffassung der Bindesubstanz der Netzhaut, die von M. Schultze ausgebildet ist, kann Fig. 36 geben, wo die verschiedenen Schichten mit denselben Zahlen wie in Fig. 35 bezeichnet sind. Die beiden äussersten (9 u. 10) Schichten fehlen auf dieser Figur. Gewisse Körner der inneren Körnerschicht (5 Fig. 35 und 36) hält M. Schultze für Kerne der radialen Bindegewebsfasern und sind solche daher in das Schema der Bindesubstanz (Fig. 36) aufgenommen, die übrigen Körner dieser Schicht aber hält er für nervöse Elemente.

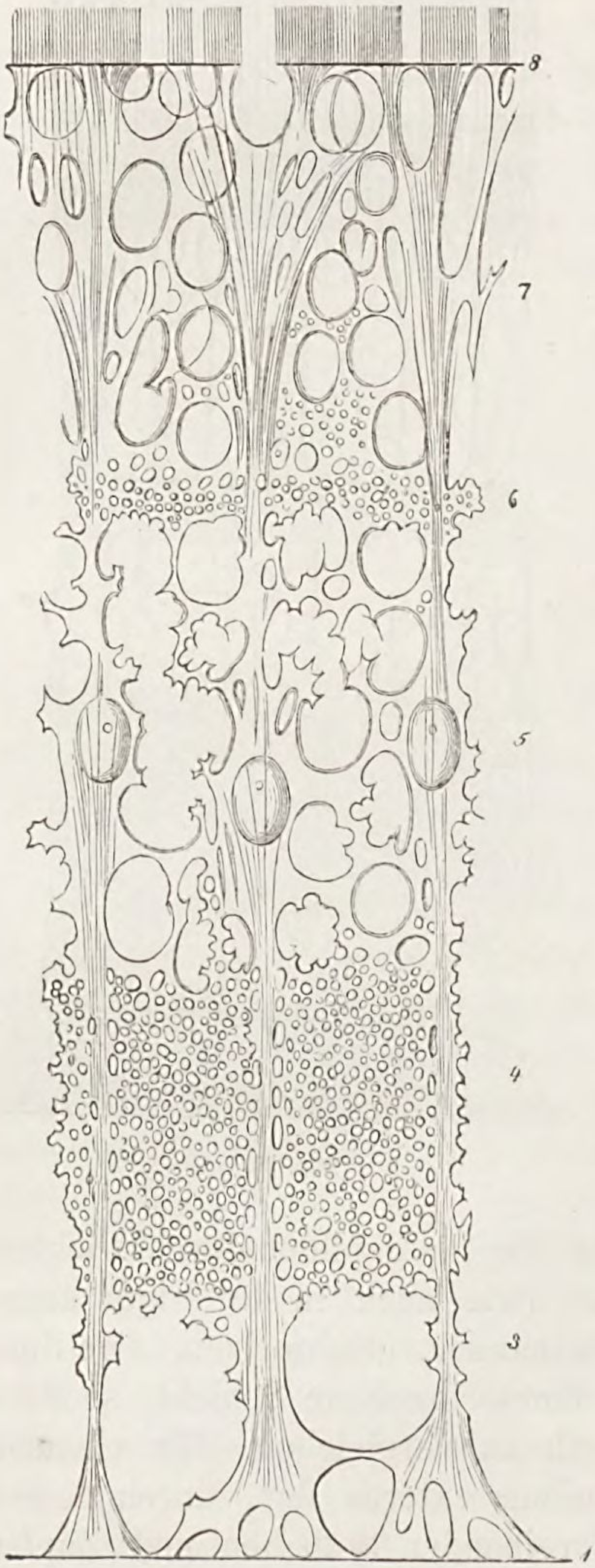


Fig. 36.

Die unzweifelhaft nervösen oder wenigstens allgemein für nervös gehaltenen Elemente, welche in dem beschriebenen Bindesubstanzlager eingebettet liegen, sind folgende. Die Opticusfasern ziehen der Fläche parallel in der zweiten Schicht dicht unter der limitans interna. Es sind marklose Nervenfasern von grosser Feinheit. Sie gehen im Allgemeinen in Bündel gesondert strahlenartig von der

Eintrittstelle des Sehnerven nach allen Seiten. Eine besondere Form aber haben die Faserzüge um den gelben Fleck herum, d. h. um die ausgezeichnete Stelle der Netzhaut, welche dem Hornhautscheitel ziemlich diametral gegenüber liegt und die schon früher (s. S. 66) als die Stelle des schärfsten Sehens bezeichnet ist. Diese Stelle wird von den Opticusfaserzügen umgangen, so dass sie nicht von einer Faserschicht bedeckt ist. Eine Anschauung von dem Gang der Faserzüge kann Fig. 37 geben, wo die Opticuspapille das Centrum der

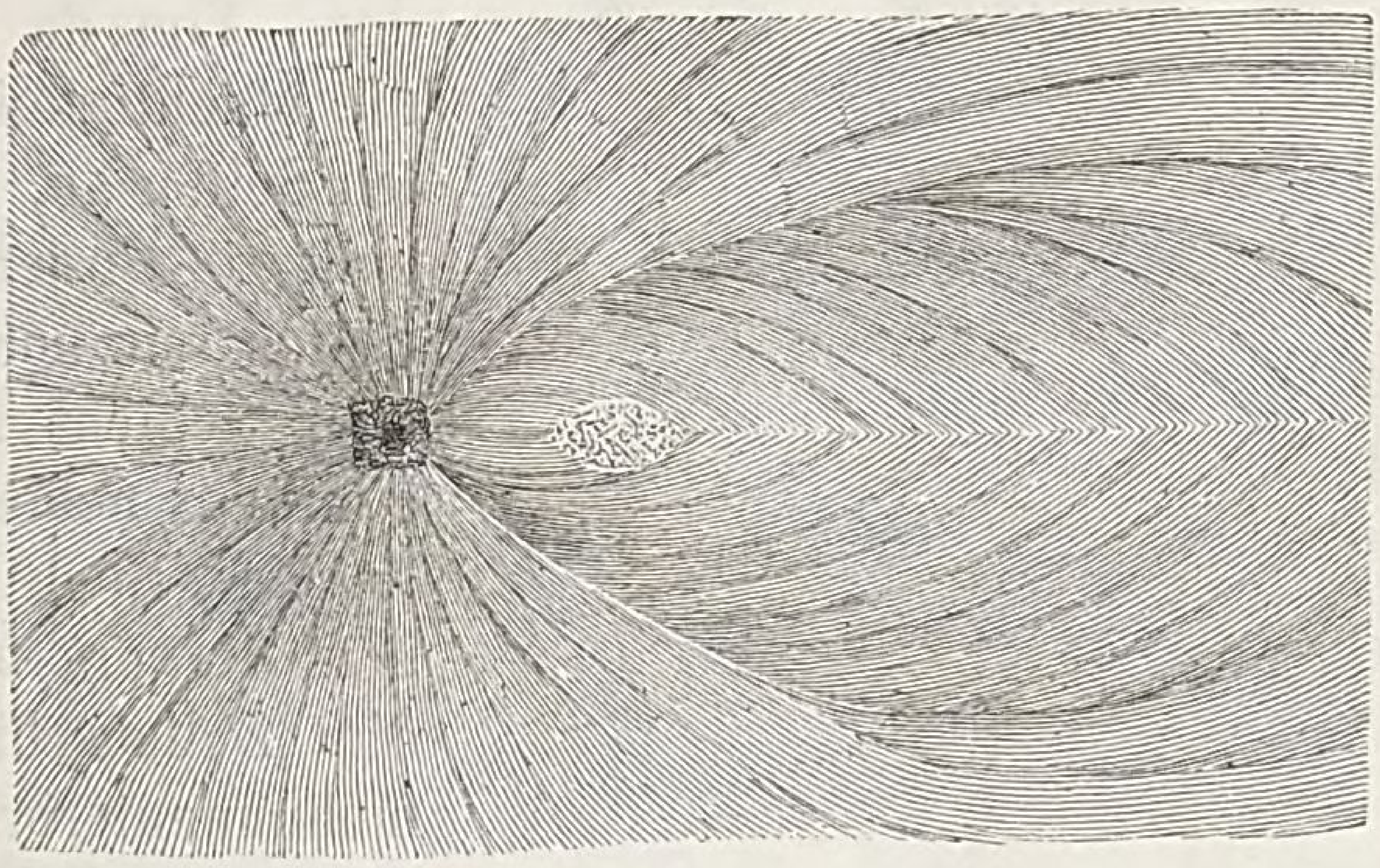


Fig. 37.

Ausstrahlung bildet und etwas rechts davon der gelbe Fleck zu sehen ist. Die Mächtigkeit der Sehnervenfaserschicht ist an der Papille am grössten, wo mehrere Fasern in der Dicke übereinanderliegen, und nimmt von da nach der ora serrata stetig ab. Schon 8 mm. von der Papille liegen die Fasern blos in einfacher Schicht, jedoch noch gedrängt. Noch weiter nach vorn ist die Faserschicht nicht mehr vollständig geschlossen.

Manche Forscher wollen Verzweigungen der Opticusfasern gesehen haben, doch wird dies von andern für eine Verwechselung gehalten und sind solche Verzweigungen in der That sehr unwahrscheinlich.

Die Ganglienzellen, welche die Hauptmasse der 3. Netzhautschicht ausmachen, gleichen in jeder Beziehung den multipolaren Ganglienzellen anderer Theile des Cerebrospinalorganes wie Fig. 38 zeigt, welche einige Ganglienzellen aus der Netzhaut des Kalbes in der für solche Objekte üblichen Vergrösserung darstellt. Unter den Fortsätzen jeder Ganglienzelle ist einer besonders ausgezeichnet durch seine Stärke und sein glänzendes Aussehen. Er bleibt ungetheilt und geht in eine Opticusfaser über, die andern Fortsätze gehen nach aussen und thei-

len sich alsbald in verschwindend feine Fädchen, welche sich in die granulirte Schicht verlieren. Ob die Ausläufer benachbarter Ganglienzellen sich untereinander verbinden ist nicht ausgemacht, jedoch wollen es manche Forscher beobachtet haben.

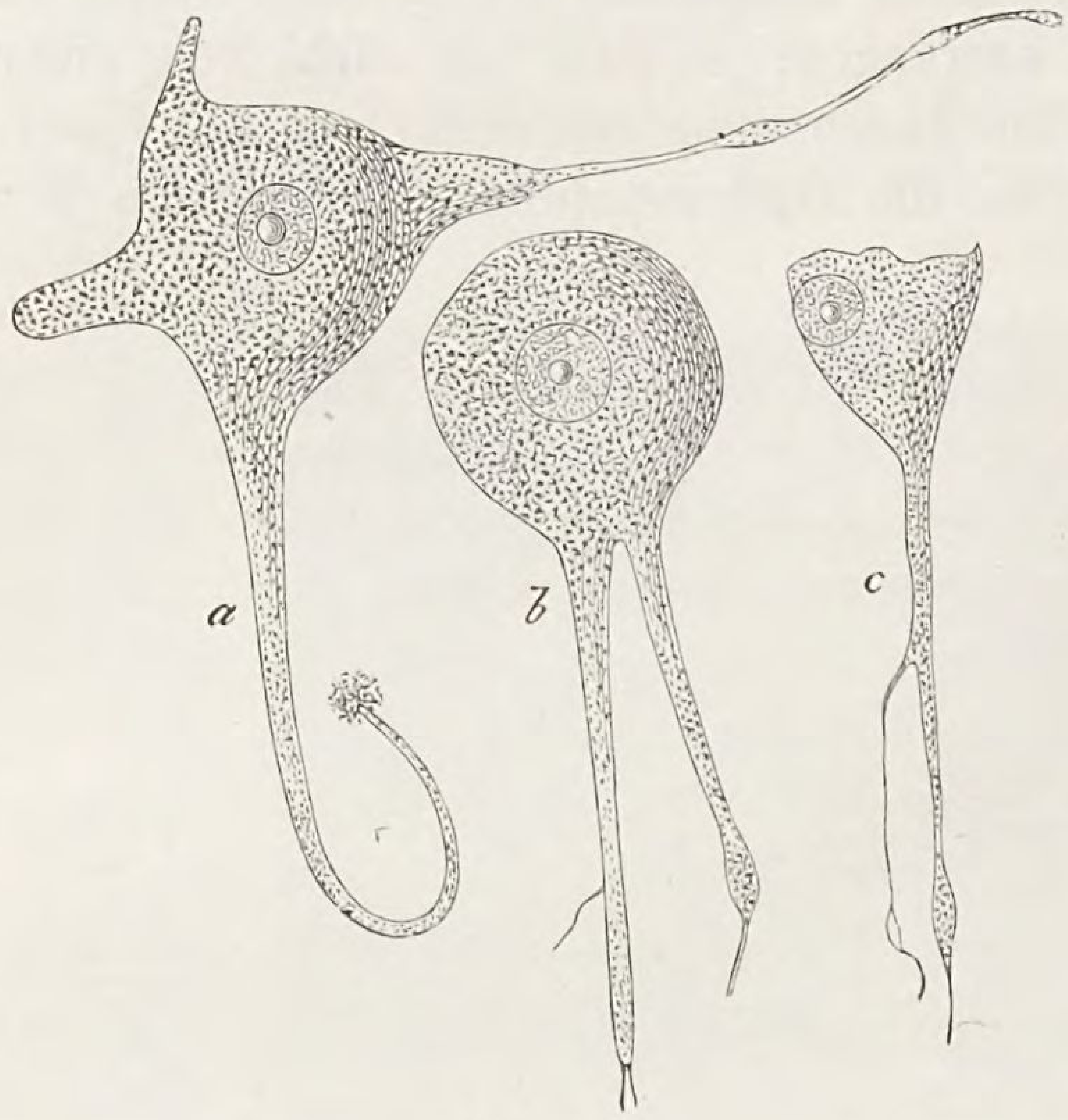


Fig. 38.

Die Ganglienzellenschicht ist im gelben Fleck am mächtigsten. Hier liegen in der Dicke 8—10 Zellen übereinander. Von da an nimmt die Mächtigkeit nach allen Seiten ab, so dass in einiger Entfernung die Zellen nur noch in einfacher Schicht aber dicht gedrängt neben einander liegen. Noch weiter gegen die ora serrata ist die Zellenschicht nicht mehr ununterbrochen, sondern man findet nur vereinzelte durch mehr oder weniger grosse Zwischenräume getrennte Zellen.

Die nervösen Elemente der inneren granulirten Schicht sind nicht vollkommen deutlich zu unterscheiden. Am wahrscheinlichsten sind es äusserst feine Fädchen, welche mit den äusseren Fortsätzen der Ganglienzellen zusammenhängen. Diese Fädchen scheinen einen verworrenen Filz zu bilden, der in das Lückensystem des hier reichlichen schwammigen Bindegewebes eingebettet ist.

Die Mehrzahl der Körner der inneren Körnerschicht hält man für nervöse Gebilde, da sie in ihrem Ansehen und in allen chemischen Reaktionen kleinen Ganglienzellen gleichen. Jedes solche Korn besitzt zwei Ausläufer deren einer nach innen einer nach aussen gerichtet ist. Der erstere dürfte in Zusammenhang stehen mit Fädchen der inneren granulirten Schicht der andere mit solchen der äusseren granulirten Schicht. In dieser letzteren scheint wie in der inneren granulirten Schicht ein Filz von nervösen Fäden vorhanden zu sein, die wahrscheinlich wie soeben ausgesprochen wurde mit den äusseren Ausläufern der Zellen der inneren Körnerschicht zusammenhängen. Von Schwalbe wird übrigens dieser Zusammenhang in Abrede gestellt. Er behauptet, dass die äusseren Ausläufer der inneren Kör-

ner die äussere granulirte Schicht einfach durchsetzen ohne sich mit dem Faserfilz derselben zu verbinden. Dieser würde alsdann wohl für gar nicht nervös anzusehen sein. Es finden sich in der äusseren granulirten Schicht ausserdem zahlreiche sternförmige platte Zellen, denen die nervöse Natur von den besten Beobachtern aber abgesprochen wird.

In der äusseren Körnerschicht herrschen wieder die unzweifelhaft nervösen Elemente über die bindegewebigen sehr entschieden vor. Jedes Korn dieser Schicht hängt durch eine radiale Faser deutlich zusammen mit einem Elemente der Stäbchenschicht. Den zweierlei Elementen dieser letzteren entsprechend kann man daher Stäbchenkörner und Zapfenkörner unterscheiden, die auch im Bau, Grösse und Lage verschieden sind. Die Zapfenkörner sind nämlich grösser und liegen an der äusseren Seite der äusseren Körnerschicht, so dass sie eigentlich ohne Zwischenfaser unmittelbar mit den Zapfen zusammenhängen nur durch eine im Niveau der limitans externa befindliche Einschnürung vom Zapfen abgesetzt. Die Stäbchenkörner sind kleiner und durch einen mehr oder weniger langen radialen Faden mit ihren Stäbchen verbunden. Ferner zeigt jedes Stäbchenkorn ein Paar Querstreifen, die den Zapfenkörnern fehlen. Gegenüber dem mit einem Stäbchen oder Zapfen in Verbindung stehenden Ende sendet jedes Korn der in Rede stehenden Schicht einen radicalen Ausläufer nach innen, welcher in der äusseren granulirten Schicht untertaucht und hier nach der einen Auffassung in den Faserfilz eingeht oder sie durchsetzt um direkt in einen Ausläufer eines Kornes der inneren Körnerschicht überzugehen.

Die Schicht der Stäbchen und Zapfen besteht aus dichtgedrängten nervösen Elementen von zweierlei Art. Gemeinsam ist beiderlei Elementen die vorwiegende Ausdehnung in der radialen Richtung und die Zusammensetzung aus zwei deutlich unterscheidbaren Theilen dem sogenannten Innenglied und Aussenglied. In Fig. 35 ist deutlich zu sehen, wo das dunkler schattirte und punktirte Innenglied sich von dem hell gezeichneten ganz cylindrischen Aussenglied absetzt. Die Grenzen liegen gerade in der Linie, welche die beiderseits stehenden Zahlen 9 verbindet. Das Innenglied der Stäbchen sowohl als der Zapfen zeigt unter dem Mikroskop ganz das Ansehen einer Protoplasmamasse. Man sieht daran oft eine Längsstreifung, welche von einigen Autoren erklärt wird durch die Anwesenheit feiner Fäserchen, welche von der limitans externa zwischen die Elemente der Stäbchenschicht hineinragen.

Die Aussenglieder der Stäbchen und Zapfen zeichnen sich unter

dem Mikroskope durch starken Glanz aus. Sie scheinen aus einer sehr stark lichtbrechenden Substanz zu bestehen. Oefters ist auch an den Aussengliedern eine Längsstreifung wahrgenommen, welche von einigen auf das Vorhandensein einer Faser in der Axe derselben bezogen wird. Besonderes Gewicht haben manche neuere Autoren besonders M. Schultze auf den Umstand gelegt, dass die Aussenglieder leicht der Länge nach in äusserst dünne Plättchen von grosser Regelmässigkeit zerfallen.

Bei dieser grossen Uebereinstimmung im Bau darf wohl angenommen werden, dass die Stäbchen und Zapfen nicht wesentlich verschiedene Gebilde sind. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die Zapfen etwas dicker sind namentlich das Inneńglied. Das Aussenglied des Zapfens ist dagegen ein wenig kürzer als das des Stäbchens und läuft nach aussen spitz zu.

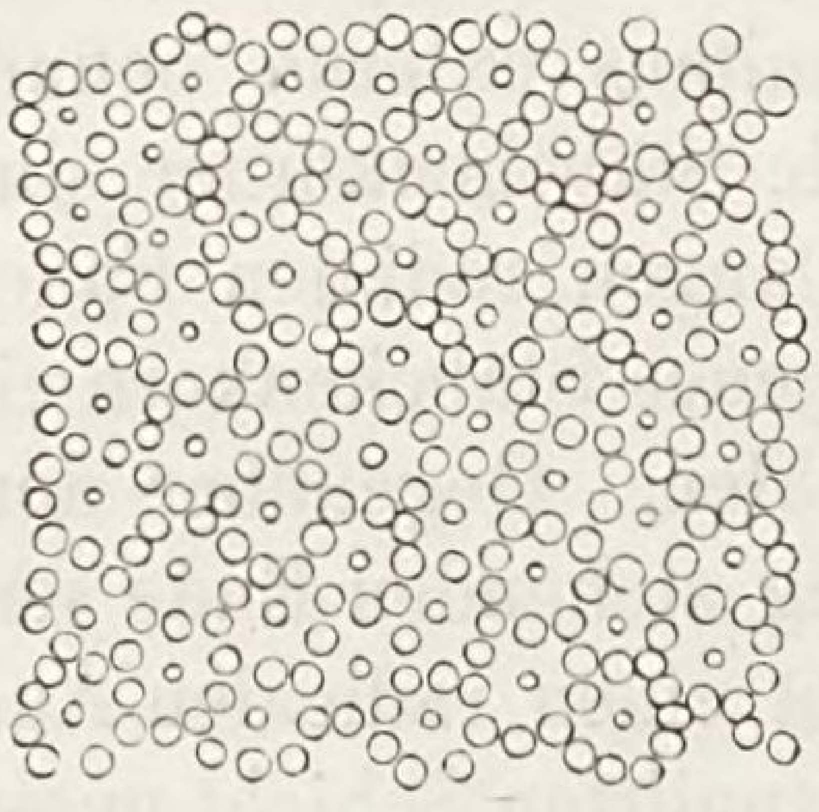


Fig. 39.

Die Vertheilung der beiderlei Elemente ist in verschiedenen Theilen der Netzhaut verschieden. Im gelben Fleck sind bloss Zapfen vorhanden. In der Nähe des gelben Fleckes ist jeder Zapfen von einem einfachen Kranze von Stäbchen umgeben, wie Fig. 39 zu sehen ist. Gegen die Ora serrata hin werden die Zapfen immer seltener, so dass die Stäbchenschicht senkrecht auf ihre Flächenausbreitung betrachtet den Anblick der Fig. 40 darbietet.

Mit den Aussengliedern der Stäbchen und Zapfen in engstem Zusammenhange stehen die Zellen des Pigmentepithels der Netzhaut.

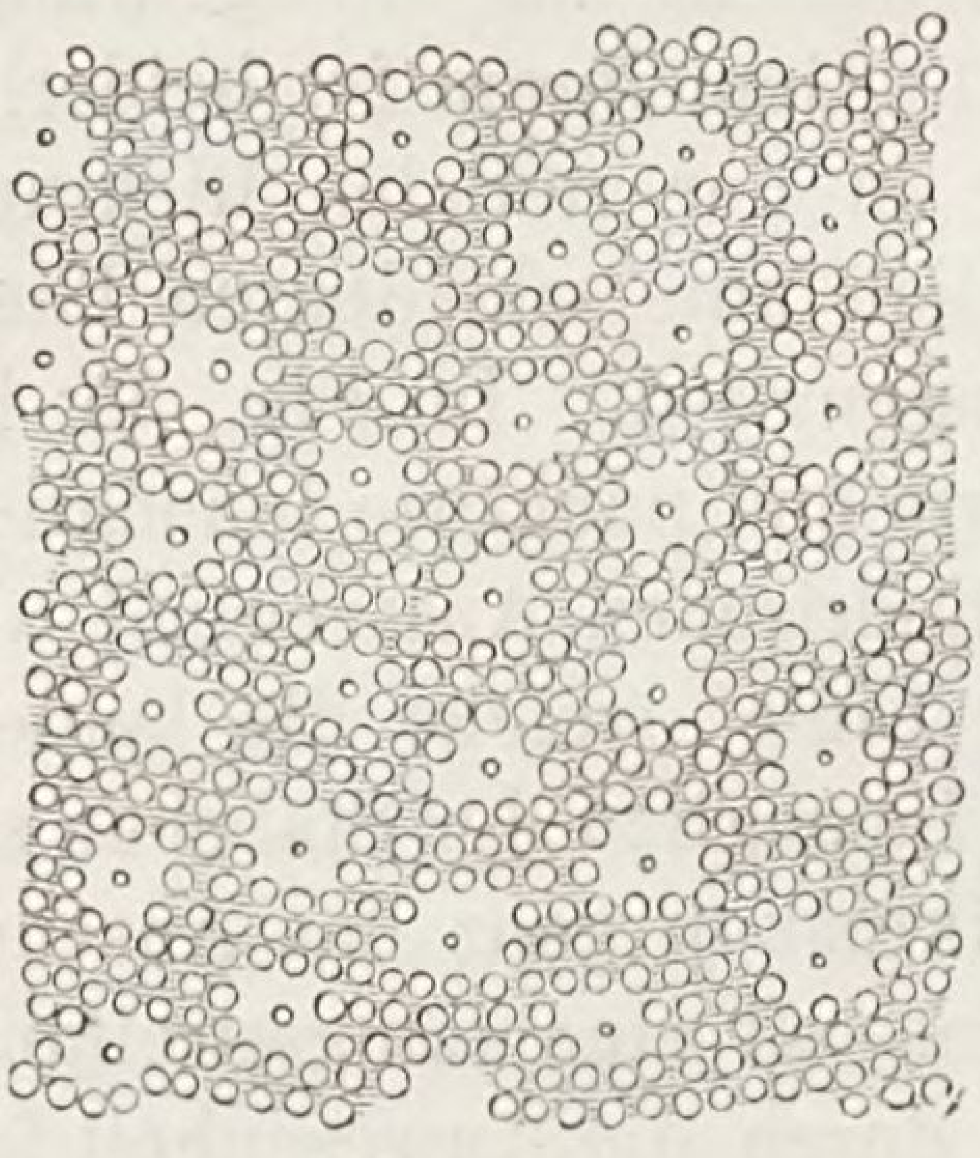


Fig. 40.

Es bildet ein regelmässiges Mosaik von platten sechseckigen Zellen, welche aber pigmentirte Fortsätze zwischen die Aussenglieder der Stäbchen und Zapfen hineinerstrecken. Diese sind davon scheidenartig umgeben. In Fig. 41 sieht man unter *a* das Mosaik der Pigmentzellen in seiner Ausbreitung unter *b* sind zwei Zellen mit ihren Fortsätzen von der Seite zu sehen; unter *c* sieht man noch einige Stäbchenaussenglieder in den Pigmentzelle festhängen. Ueber die Schichten der Netzhaut ist endlich noch zu sagen, dass die äussere Körnerschicht und was von ihr nach aussen liegt, vollständig gefässlos ist.

Der muthmaassliche Zusammenhang der sämmtlichen nervösen Elemente der Netzhaut ist in Fig. 42 übersichtlich dargestellt. Es wird allgemein angenommen, dass die Sehnervenfasern durch Vermitt-

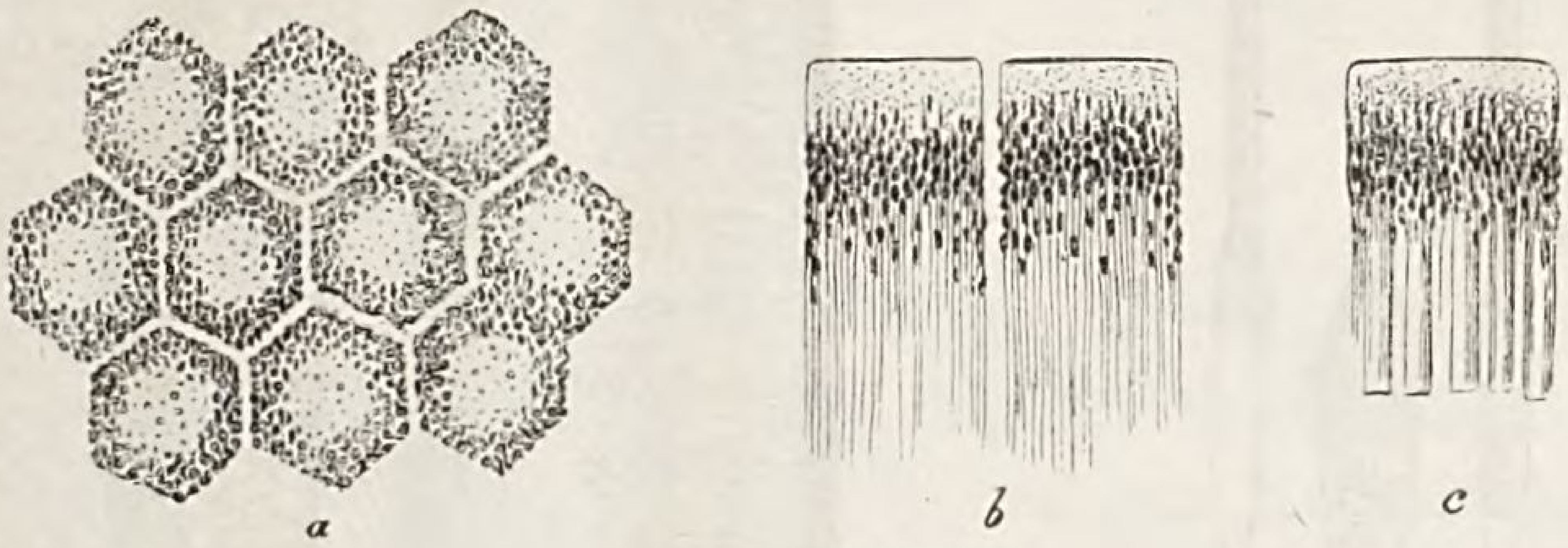


Fig. 41.

lung der Ganglienzellen und radialer Fasern, in welche Körner der inneren und äusseren Körnerschicht eingelagert sind, mit Stäbchen und Zapfen zusammenhängen. Streitig ist das Verhalten der radialen Nervenfasern in der inneren und äusseren granulirten Schicht indem einige Autoren (namentlich SCHULTZE) annehmen, dass hier die radialen Fasern in einen Faserfilz eingehen, andere (SCHWALBE) geneigt sind zu glauben, dass sie diesen Faserfilz ohne damit zusammenzuhängen durchsetzen.

In Fig. 43 ist endlich noch eine Darstellung eines senkrechten Schnittes durch die Gegend des gelben Fleckes, der physiologisch besonders ausgezeichnet ist. Die Schichten sind mit denselben Zahlen wie in Fig. 35 bezeichnet.

ZWEITES CAPITEL.

Ort der Reizung durch Lichtschwingungen.

I. Anatomische Betrachtungen.

Die Antwort auf die Frage, welche Elemente der Netzhaut durch Lichtstrahlen reizbar sind, lässt sich erstens in rein anatomischen Erwägungen suchen. Man muss offenbar annehmen, dass die reizbaren Vorrichtungen sich am äussersten peripherischen Ende der Verkettung nervöser Elemente finden, denn eine weitere Fortsetzung dieser Verkettung über den reizbaren Punkt hinaus hätte offenbar keinen Sinn. Nun sind, wie in den vorigen Paragraphen gezeigt ist, nach

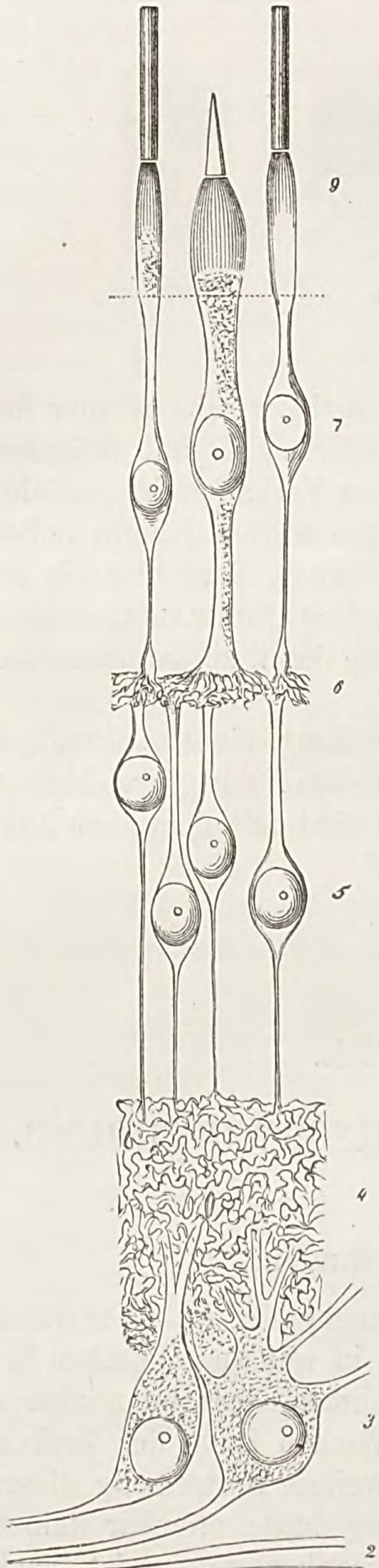


Fig. 42.

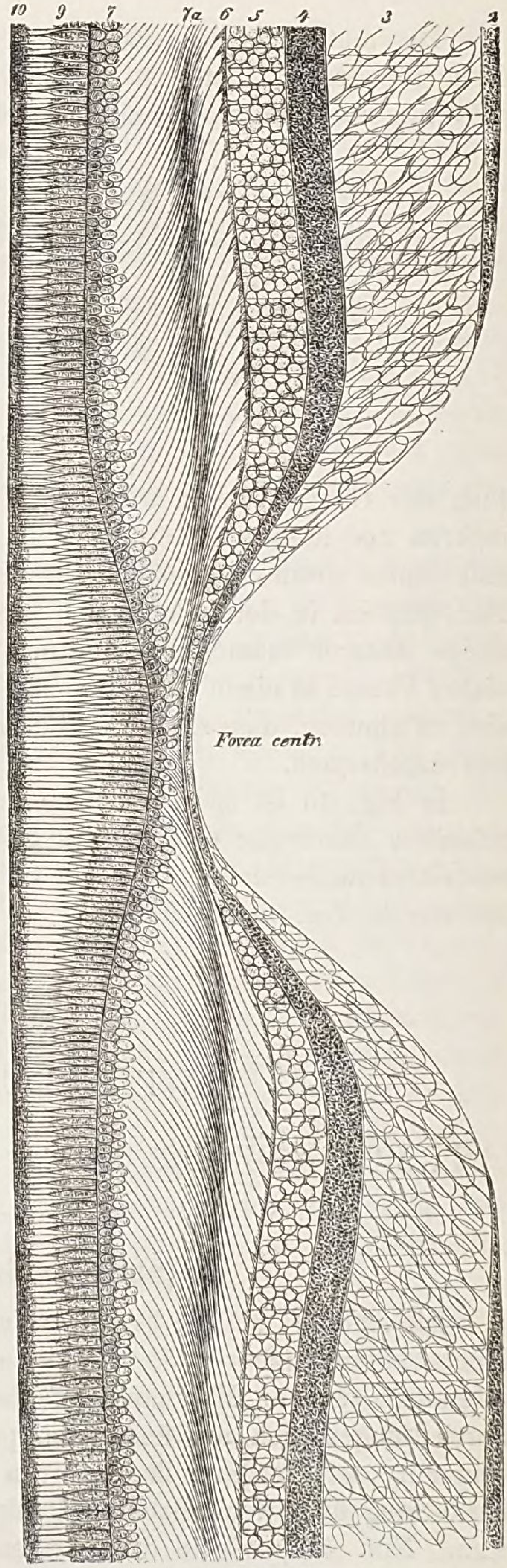


Fig. 43.

den bestbegründeten Annahmen der Anatomen die letzten peripherischen Glieder jener Verkettung nervöser Elemente in der Netzhaut die Stäbchen und Zapfen.

Zu demselben Ergebnisse führt aber die physiologische Ueberlegung. Die Thatsache, dass eine Gruppe dicht beieinanderliegender leuchtender Punkte als solche erkannt werden kann, d. h. dass jeder Punkt derselben gesondert gesehen wird, sobald ein optisches Bild dieser Gruppe auf die Retina fällt, zieht die Folgerung nach sich, dass die Schicht der Netzhaut, in welcher die Strahlungen zur Nervenreizung Anlass werden, einen mosaikartigen Bau besitzen muss. D. h. es muss jedes Element dieser Schicht in keiner zur betreffenden Netzhautstelle tangentialen Richtung eine ansehnliche Ausdehnung besitzen und es dürfen in der zur Netzhautfläche normalen Richtung nicht mehrere Elemente übereinanderliegen. Nur so ist es denkbar, dass jedes auf einen Punkt koncentrirte Strahlenbündel eine und nur eine Empfindung bewirkt. Dieser mosaikartige Bau kommt aber nur der Schicht der Stäbchen und Zapfen zu. Wären z. B. die Sehnervenfasern selbst durch Lichtstrahlen reizbar, so würde eine längs eines Meridianes zum Rande der Netzhaut ziehende Faser nicht nur durch ein von einem leuchtenden Punkte ausgehendes Strahlenbündel gereizt werden, sondern von allen denen, welche ihre Vereinigungspunkte in den Punkten dieses Meridianes fänden und man könnte also alle die äusseren Punkte, deren Bilder auf diesem Meridian liegen, nicht unterscheiden, da ihre Strahlungen dasselbe nervöse Element reizten, also zusammen nur eine Empfindung hervorbrächten. Ueberdies liegen in der Nervenfaserschicht stellenweise mehrere Elemente gleicher Art hintereinander und würde also noch dazu jedes einzelne Strahlenbündel mehrere Elemente reizen, wenn sie reizbar wären. Das letztere gilt auch von den weiter nach aussen gelegenen Schichten der Ganglienzellen und der Körner und lässt also auch diese als ungeeignet erscheinen für die Angriffsstelle des Lichtreizes zu gelten.

II. Der blinde Fleck.

Ob die Sehnervenfasern in der That entschieden nicht durch Licht reizbar sind, lässt sich ganz direkt experimentell prüfen. Die Eintrittstelle des Sehnerven in die Netzhaut enthält nämlich ausser Sehnervenfasern gar keine nervösen Elemente, weder Ganglienzellen noch Körner, Stäbchen oder Zapfen. Lässt man nun auf diese Stelle das Bild eines hellen Objektes fallen, so muss sich zeigen, ob die Sehnervenfasern reizbar sind oder nicht, denn wenn sie nicht reizbar

sind, so darf in diesem Falle gar keine Lichtempfindung entstehen. Dass dem wirklich so sei, lehrt der berühmte Mariotti'sche Versuch. Er ist am einfachsten folgendermaassen anzustellen. Man bringe auf dunklem Grunde zwei kleine helle Marken in etwa 10 cm. Abstand von einander an, z. B. zwei weisse Oblaten auf schwarzem Papier. Fixirt man jetzt die rechts gelegene mit dem linken Auge aus etwa 35 cm. Entfernung, so wird die links gelegene unsichtbar. Ebenso wird die rechts gelegene unsichtbar, wenn man die links gelegene mit dem rechten Auge fixirt. Um die richtige Entfernung des Auges nicht zu verfehlen, geht man am besten aus bedeutend grösserer Entfernung an das gewählte Fixations-Zeichen allmählich heran und bemerkt dann bald, wann das andere Zeichen verschwindet und wann es bei noch weiterer Annäherung wieder auftaucht. Das nicht benutzte Auge muss bei dem Versuche geschlossen werden. Man kann übrigens auch schwarze Marken auf hellem Grunde zum Versuche benutzen, denn wenn eine Stelle der Netzhaut unerregbar durch Licht ist, so kann eben nicht unterschieden werden, ob Licht von einem Punkte des hellen Hintergrundes oder kein Licht von der dunkeln Marke darauf fällt. Ein schwarzer Punkt auf hellem Grunde verschwindet also auch, wenn sein Bild auf die fragliche unempfindliche Stelle der Netzhaut fällt.

Da aus den beschriebenen Thatsachen hervorgeht, dass die unsichtbaren Punkte des Gesichtsfeldes schläfenwärts vom fixirten Punkte liegen, so muss die unempfindliche Stelle der Netzhaut nasenwärts vom Pole derselben liegen.

Bei genauerer Zergliederung findet sich ferner meist die Mitte des unsichtbaren Fleckes etwas unterhalb des wagrechten Meridianes der Mittelpunkt der unempfindlichen Netzhautparthie liegt demnach meist etwas oberhalb dieses Meridianes, was für die Eintrittstelle des Sehnerven bekanntlich zutrifft. Dass nun wirklich diese ganze Stelle und nicht etwa — wie manche behauptet haben — blos die Eintrittstelle der vasa centralia retinae durch Licht nicht reizbar ist, geht aus der genaueren Untersuchung der Grösse und Gestalt des unsichtbaren Theiles des Gesichtsfeldes mit Sicherheit hervor. Bei einiger Uebung im Fixiren und Beobachten seitlich gelegener Objekte kann man den unsichtbaren Theil eines Papierblattes sehr leicht genau umschreiben. Man fixirt nämlich einen bezeichneten Punkt des Blattes und bringt die dunkle Spitze eines sonst hellfarbigen schreibenden Stiftes zunächst ins Innere des ungesehenen Raumes, schiebt ihn dann in irgend einer Richtung langsam vor bis die Spitze eben sichtbar wird, hier macht man ein Zeichen auf das Blatt und

verfährt gerade so in möglichst vielen verschiedenen Richtungen, dann erhält man ebensoviele Punkte von der Umgrenzung des unsichtbaren Theiles des Blattes. HELMHOLTZ zeichnete nach diesem von ihm angegebenen Verfahren den für sein rechtes Auge unsichtbaren Theil eines Papierblattes, wie es in Fig. 44 durch den schwarzen Fleck angegeben ist. Das Kreuzchen bei *a* ist der fixirte Punkt und die Linie *AB* der dritte Theil der zugehörigen Entfernung des Auges vom Papierblatte. Man sieht, dass die Form und Grösse des schwarzen Fleckes ganz wohl der papilla nervi optici entspricht. Denn sein Bild auf der Netzhaut in einem um 3 *AB* abstehenden Auge würde einen Durchmesser von etwa 2 mm. haben, also den Durchmesser der vasa centralia retinae bei weitem übertreffen. Man sieht übrigens in der Figur, dass die Stellen, wo die vasa centralia aus der Papille austreten auch noch in den Bereich der unempfindlichen Stelle gehören.

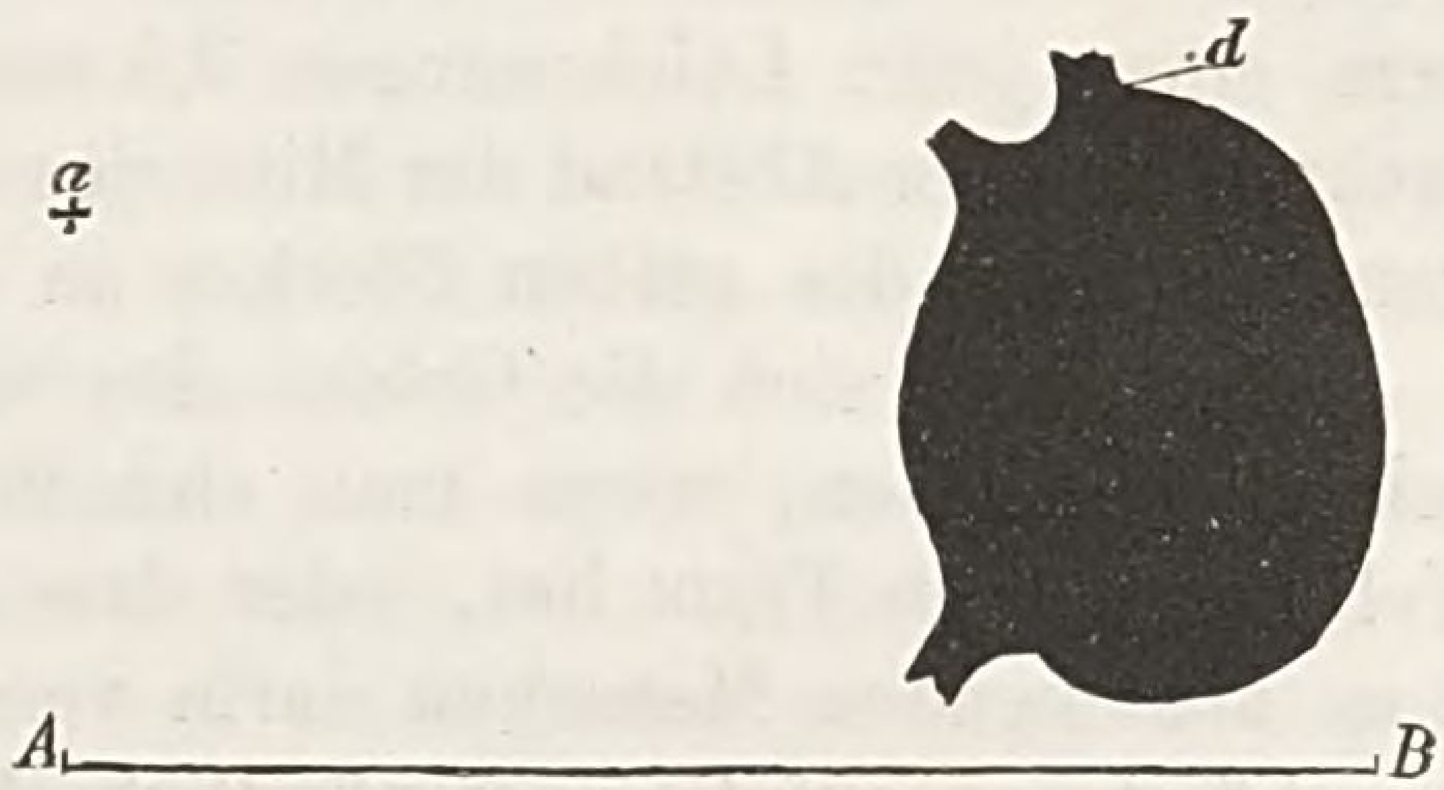


Fig. 44.

Der Winkel zwischen der Fixationsrichtung und dem Richtungsstrahl zum nächstbenachbarten Punkte des unsichtbaren Raumes beträgt nach LISTING 12° 37′, nach HELMHOLTZ 12° 25′, nach TH. YOUNG 12° 56′; der Winkel zwischen dem Richtungsstrahl zum äussersten Punkte des unsichtbaren Raumes und der Fixationsrichtung beträgt nach LISTING 18° 33′, nach HELMHOLTZ 18° 55′, nach TH. YOUNG 16° 1′. Der wagrechte Durchmesser des unsichtbaren Fleckes umspannt einen Gesichtswinkel von 3° 39′ bis 9° 47′, nach Messungen von HANNOVER und THOMSEN an 22 verschiedenen Augen. Das Mittel aus allen diesen Messungen beträgt 6° 10′. LISTING fand für diese Grösse den Werth 5° 56′, GRIFFIN in maximo 7° 31′, HELMHOLTZ 6° 56′, TH. YOUNG 3° 5′. HELMHOLTZ zweifelt jedoch an der Zuverlässigkeit dieser letzteren auffallend kleinen Angabe, weil YOUNG eine ungeeignete Methode angewandt habe. Aus den mitgetheilten Angaben lässt sich der Durchmesser der unempfindlichen Netzhautstelle berechnen, wenn man über die Entfernung des Knotenpunktes von der Netzhaut eine bestimmte Annahme macht. Setzt man sie = 15 mm., so ergiebt sich für LISTING's Auge 1,55 mm., für HELMHOLTZ's Auge 1,81 mm. und als Mittel für die von HANNOVER und THOMSEN beobachteten Augen 1,61 mm. E. H. WEBER fand bei zwei

Leichenaugen den wagrechten Durchmesser der Eintrittstelle des Sehnerven = 2,1 mm. und = 1,72 mm. was mit den soeben gefundenen Werthen des Durchmessers nahezu übereinstimmt, dagegen war der grösste Durchmesser des Stranges der vasa centralia nach den Messungen von Weber nur 0,31 resp. 0,28 mm. Der Abstand der Mitte des gelben Fleckes von der Mitte der Sehnervenpapille betrug bei dem einen jener Leichenaugen 3,8 mm. und in Listing's Auge berechnet sich der Abstand der Mitte des unempfindlichen Netzhauttheils von der Mitte des gelben Fleckes zu 4,05 mm.

Man kann sich die Grösse des unsichtbaren Raumes recht anschaulich machen, wenn man sich vorstellt, dass etwa 11 mal der Vollmond darin Platz hat, oder dass das Gesicht eines etwas über 2 m. abstehenden Menschen darin verschwinden kann.

Lässt man auf die unempfindliche Netzhautstelle sehr starke Lichtstrahlen fallen, z. B. das Bildchen der Sonne, so erfüllt sich das ganze Gesichtsfeld mit einem Lichtschimmer aber offenbar nur darum, weil von den stark durchleuchteten Sehnervenfasern diffuses Licht auf der ganzen Netzhaut verbreitet wird und nicht etwa weil die starke Strahlung die Nervenfasern selbst reizt.

III. Sehschärfe.

Es lassen sich durch Prüfung des Ortsinnes der Netzhaut noch weitere Gründe für die Annahme beibringen, dass gerade die Stäbchen und Zapfen die reizbaren Elemente der Netzhaut sind und dass wenigstens in gewissen Theilen dieses Organes jedes einzelne Element der äussersten reizbaren Schicht in isolirter Verbindung mit der Gegend des Nervensystems steht, deren molekulare Bewegungen für die äussere Anschauung eines Anderen das sind, was für die innere Anschauung des Subjektes selbst bewusstes Empfinden ist. Wenn nämlich dies der Fall ist, so ist es denkbar und es ist nur in diesem Falle denkbar, dass wenn zwei benachbarte Zapfen oder Stäbchen von zwei verschiedenen Lichtreizen getroffen werden, dadurch zwei unterscheidbare Empfindungen entstehen, und dass zwei Lichtempfindungen dann auf räumlich getrennte Objekte als Ursachen bezogen werden, wenn die gereizten Stellen nur um die Breite eines jener Elemente auf der Netzhaut von einander entfernt sind.

Ueber die Entfernung, in welcher sich zwei leuchtende Objekte von einander befinden müssen, um durch den Gesichtssinn als räumlich getrennt wahrgenommen zu werden, sind von verschiedenen Forschern Versuche angestellt. So erscheinen nach Hooke zwei Sterne

nicht mehr als getrennt, wenn ihr Abstand einen Gesichtswinkel von weniger als 60″ umspannt. Das schärfste von E. H. Weber untersuchte Auge konnte zwei weisse Striche erst dann getrennt wahrnehmen, wenn die Entfernung derselben einen Gesichtswinkel von mindestens 73″ umspannte. Helmholtz konnte noch bei einer Entfernung, welche 64″ spannt, die Striche getrennt sehen. Der Abstand zweier Netzhautpunkte aber, deren Richtungsstrahlen Winkel von 60″, 64″, 73″ miteinander bilden, beträgt beziehlich 0,00438 mm., 0,00464 und 0,00526 mm. Andererseits beträgt die Dicke eines Zapfens im gelben Fleck nach Kölliker's Bestimmungen 0,0045 bis 0,0055 mm. Man sieht hiernach, dass die Thatsachen des Sehens ganz wohl zu der Annahme stimmen, dass jeder Zapfen des gelben Fleckes bei seiner Erregung eine besondere, von jeder anderen unterscheidbare Lichtempfindung vermitteln kann.

Auffallend kann nur erscheinen, dass die durch den anatomischen Bau der Netzhaut gegebene Grenze der Genauigkeit des Sehens auch wirklich nahezu erreicht wird, obgleich doch, wie im ersten Abschnitte gezeigt wurde, die optischen Bilder auf der Netzhaut, selbst bei möglichst vollkommener Einstellung des dioptrischen Apparates, mit grossen Fehlern behaftet sind. So sind die Zerstreuungskreise in Folge der Farbenabweichung bei 4 mm. weiter Pupille in weisser Beleuchtung mindestens 0,04 mm. breit und es müssen also diese Zerstreuungskreise von zwei Punkten, die einen Winkelabstand von nur 70″ am Kreuzungspunkte umspannen, schon weit übereinandergreifen. Dies Uebereinandergreifen der Zerstreuungskreise macht aber die Trennung der beiden Punkte im Bewusstsein nicht unmöglich, denn es kann ein Zapfen zwischen den beiden wahren Bildpunkten eine merklich verschiedene Beleuchtung haben von denen, welche diese Bildpunkte aufnehmen, weil, wie früher gezeigt wurde, die Lichtvertheilung in den Zerstreuungskreisen wegen der Farbenabweichung vom Centrum nach der Peripherie rasch abnimmt.

Wenn man parallele weisse Striche mit schwarzen Zwischenräumen aus solcher Entfernung betrachtet, dass die Breite des Zwischenraumes nahezu unter jenem Grenzwinkel erscheint, dann zeigt sich ehe das völlige Verschwimmen der Striche ineinander eintritt, eine eigenthümliche Erscheinung. Die einzelnen Striche erscheinen nämlich stellenweise knotig angeschwollen oder geknickt, wie es in Fig. 45 unter *A* angedeutet ist. Bisweilen erscheint auch die ganze Figur mehr schachbrettartig gemustert. Bergmann, der diese Erscheinung zuerst beschrieben hat, giebt derselben die Deutung, welche in Fig. 45 durch die Zeichnung unter *B* erläutert wird. Die Sechsecke sollen

das Zapfenmosaik andeuten und man sieht, dass wenn ein Streifenbild darauf entworfen wird, bei der gehörigen Kleinheit ein schwarzer Streif bald auf einen Zapfen beschränkt bleibt, bald sich auf zwei vertheilt, wo dies letztere der Fall ist, wird der Streif breiter erscheinen. Wenn gar benachbarte Zapfen von zwei benachbarten schwarzen Streifen theilweise bedeckt werden, so müssen hier die benachbarten Streifen zusammenzufliessen scheinen, was, wenn es häufig vorkommt, den schachbrettartigen Anblick hervorbringen kann.

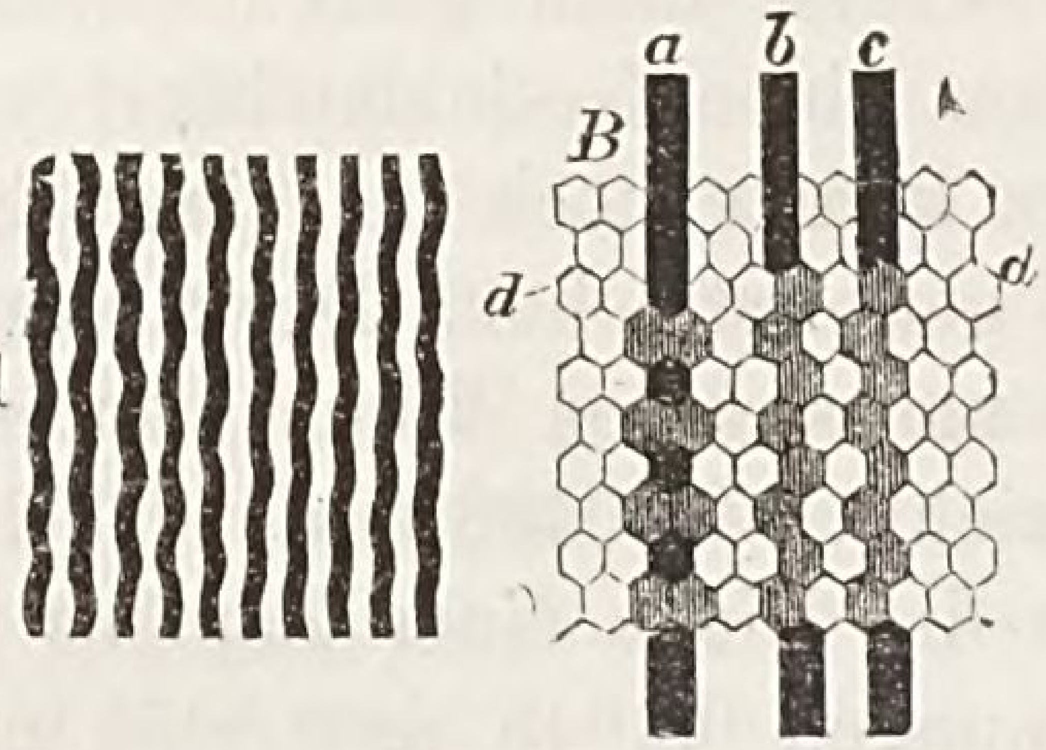


Fig. 45.

Auf den Seitentheilen der Netzhaut müssen zwei Bilder viel weiter auseinanderliegen als auf dem gelben Fleck, wenn sie als getrennt wahrgenommen werden sollen. Die ersten eingehenden Untersuchungen über diesen Gegenstand sind von Aubert und Förster angestellt. Sie rückten ein aus zwei schwarzen Punkten auf hellem Grunde bestehendes Objekt so lange vom fixirten Punkte weiter weg, bis die beiden Punkte nicht mehr als getrennt wahrgenommen werden konnten und zwar führten sie solche Prüfungen in verschiedenen Meridianrichtungen aus. Für zwei Punkte von je 2,5 mm. Durchmesser deren Mittelpunkte sich in 14,5 mm. Abstand voneinander befinden, stellt Fig. 46 das Ergebniss der Messung graphisch dar.

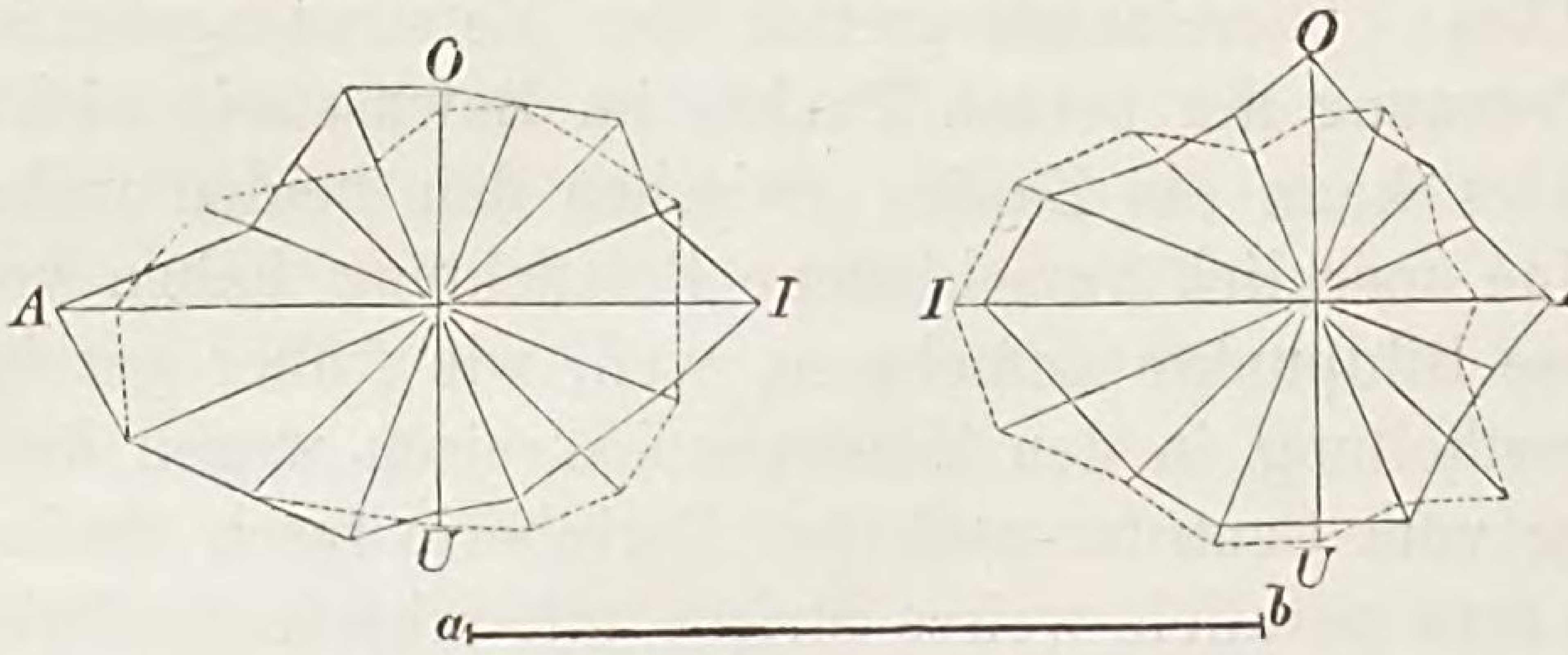


Fig. 46.

Die Linie *ab* giebt den Maassstab insofern sie den senkrechten Abstand des Auges von der Tafel bedeutet, auf welcher das aus jenen beiden Punkten bestehende Objekt verschoben wurde. Im wirklichen Versuche betrug dieser Abstand (das Fünffache von *ab*) 200 mm. und es wurde stets derselbe und zwar der am Auge nächste Punkt der Tafel fixirt. Die sternförmig auseinander laufenden Linien bedeuten die Schnittlinien der verschiedenen Meridianebenen des Auges mit der Ebene der Tafel, ihr gemeinsamer Schnittpunkt ist also der fixirte

Punkt. Die Länge eines Strahles bis zur Umfangslinie misst in 1/5 der natürlichen Grösse wie weit die der betreffenden Meridianrichtung das Objekt vom fixirten Punkte verschoben werden musste, damit die beiden Punkte nicht mehr als getrennte wahrnehmbar waren. Die beiden ausgezogenen Umfangslinien beziehen sich auf AUBERT's, die beiden punktirten auf FORSTER's rechtes und linkes Auge. Die Buchstaben an der wagrechten Linie *I* und *A* bezeichnen die Innen- oder Nasenseite und die Aussen- oder Schläfenseite, *O* und *U* bedeuten oben und unten. Die eingeschlossenen Figuren sind also geradezu Theile des Gesichtsfeldes innerhalb dessen genau genug gesehen wird, um in etwa 200 mm. Abstand zwei 14,5 mm. voneinander entfernte Punkte als getrennte wahrzunehmen. Man sieht dass dieser Theil des Gesichtsfeldes im wagrechten Meridian weiter ausgedehnt ist als im senkrechten.

Nachstehende Tabelle giebt die Resultate noch einiger Versuche mit anderen ähnlichen Objekten, welche auf einer Tafel in derselben Entfernung betrachtet wurden. Die erste Spalte giebt die Entfernung der das Objekt bildenden Punkte von einander, die zweite den Durchmesser des einzelnen Punktes. In der dritten Spalte ist angegeben, wie weit das Objekt unter den durch die Zahlen der beiden ersten Spalten gegebenen Bedingungen vom Fixationspunkt weggerückt werden musste, um nicht mehr als aus zwei getrennten Punkten bestehend erkannt zu werden. Jede Zahl dieser letzten Spalte ist aber das Mittel aus allen den Messungen, welche in 8 verschiedenen Meridianrichtungen gemacht sind.

Entfernung der beiden Punkte von einander.	Durchmesser der Punkte.	Entfernung des Objektes vom fixirten Punkte.
3,25 mm.	1,25 mm.	31 mm.
6,5 „	2,5 „	50 „
9,5 „	3,75 „	55 „
12 „	1,25 „	60 „
14,5 „	2,5 „	65 „
20,5 „	3,75 „	77 „

Bei diesen Versuchen bemerkten AUBERT und FÖRSTER öfters blinde Stellen auf ihren Netzhäuten und zwar in ganz bestimmter Lage, so dass die Objekte jedesmal wieder verschwanden, so wie ihre Bilder wieder auf diese Stellen fielen. Ausserdem verschwanden die Objekte allerdings auch öfters nur zeitweise hier oder dort in Folge von momentaner Blendung.

Die beiden genannten Forscher haben über die Feinheit des

Ortsinnes der Netzhaut noch Versuche angestellt, die zwar nicht so unmittelbar eine Vorstellung von der Grösse der empfindenden Einheiten geben, aber doch auch von grossem Interesse sind. Sie betrachteten nämlich bei momentaner Beleuchtung durch den elektrischen Funken Tafeln auf denen Buchstaben und Zahlen in einer dem Beobachter völlig unbekannten Anordnung geschrieben standen, und notirten wie viele davon auf einen Blick, also ohne Aenderung der Fixationsrichtung erkannt werden konnten.[1]

Es zeigte sich bei diesen Versuchen wie zu erwarten war, dass, je grösser der Gesichtswinkel, unter welchem je eine Zahl erschien — je grösser also das Netzhautbild derselben war, um so weiter seitwärts vom gelben Fleck konnte sie noch erkannt werden. Doch hatte merkwürdigerweise auch die absolute Entfernung der Prüfungsobjekte einen Einfluss. Wurde nämlich aus gewisser Entfernung eine Zahl von bestimmter Grösse in einem gewissen Winkelabstande vom fixirten Punkte noch eben erkannt, so hätte man erwarten sollen, dass eine doppelt so grosse Zahl in doppelter Entfernung bei demselben Winkelabstand vom fixirten Punkte zu erkennen gewesen wäre, da ja ihr Netzhautbild jetzt ebensogross war und auf derselben Netzhautstelle lag, wie vorhin das der halb so grossen Zahl. Dies war aber nicht der Fall. Die doppelt so grosse und doppelt entfernte Zahl musste von dem fixirten Punkte auf der Objektebene einen viel kleineren als den doppelten Abstand haben um erkannt zu werden, oder der Winkel zwischen der Fixationsrichtung und dem Richtungsstrahl zum Mittelpunkte der Zahl musste bedeutend kleiner sein. Durch Versuche mit einfacheren Objekten hat später Aubert dieses bemerkenswerthe Ergebniss noch bestätigt und es kann kaum daran gedacht werden, dass es auf Täuschung oder Beobachtungsfehlern beruht. Eine Erklärung für diese räthselhafte Erscheinung ist bis jetzt nicht versucht worden.

Die Bestimmung der Sehschärfe oder der Fähigkeit der Netzhaut benachbarte Punkte zu unterscheiden, ist eine wichtige Aufgabe des praktischen Augenarztes der zu diesem Zwecke bequemer Methoden und einer verabredeten Maasseinheit bedarf, um die Sehschärfe verschiedener Individuen und verschiedener Zonen derselben Netzhaut numerisch auszudrücken. Als praktische Methode wird heutzutage allgemein das Vorlegen von Schriftproben in verschiedener Grösse und Entfernung angewandt. Die Schriftproben bestehen aus Buchstaben deren Dicke $^1/_5$ ihrer Höhe beträgt. Als Einheit der

1 Aubert, Beiträge zur Kenntniss des indirekten Sehens. Molesch. Unters. IV. 1858.

Sehschärfe ist diejenige angenommen, bei welcher solche Buchstaben erkannt werden, wenn ihre Höhe unter einem Gesichtswinkel von 5′ erscheint. Als Maass jeder beliebigen Sehschärfe dient dann der Quotient

$$V = \frac{d}{D}$$

wenn d der Abstand ist, bei welchem das geprüfte Individuum die betreffende Schrift lesen kann und D der Abstand, bei welchem ihre Buchstabenhöhe eben unter einem Gesichtswinkel von 5′ erscheinen würde. Vorausgesetzt wird dabei, dass das geprüfte Auge für den Abstand d genau eingestellt ist, nöthigenfalls mit Hülfe einer Linse. Die bequeme Ausführung dieser Bestimmungen, die mit der Sehweitebestimmung Hand in Hand gehen, findet man beschrieben in den Darstellungen der praktischen Augenheilkunde.[1]

Die sämmtlichen vorstehend beschriebenen Thatsachen zeigen, dass die Netzhauttheile, deren Reizung je eine und von jeder andern unterscheidbare Empfindung verursacht — die sogenannten Empfindungskreise — um so grösser werden, je weiter man sich von der fovea centralis entfernt. Diese Thatsache haben manche Autoren dahin gedeutet, dass nicht alle Elemente der äussersten Netzhautschicht durch Licht reizbar seien, sondern bloss die sogenannten Zapfen, die in der That im gelben Fleck dicht gedrängt stehen, während sie gegen den Rand der Netzhaut immer spärlicher zwischen den Stäbchen vertheilt sind. Es käme somit allerdings je ein empfindliches Element auf ein immer grösseres Flächenstück, je weiter es vom gelben Fleck abliegt. Nun sind aber die Zapfen in den Seitentheilen der Netzhaut so spärlich vertheilt und zwischen ihnen sind so grosse bloss mit Stäbchen besetzte Strecken, dass unzählige Male Bilder kleiner Objekte bei kleinen Bewegungen bald auf Zapfen bald auf zapfenfreie, also unerregbare Flächenstücke fallen, also bald auftauchen, bald verschwinden müssten. Diese Erscheinung beobachtet man, wie schon erwähnt, bisweilen aber doch bei weitem nicht so häufig, wie es bei dem anatomischen Bau der äusseren Netzhautschicht unter der in Rede stehenden Annahme zu erwarten wäre.

Man hat daher neuerdings meistens der Annahme den Vorzug gegeben, wonach auch die Stäbchen durch Lichtstrahlen reizbar sind. Die grössere Ausdehnung der Empfindungskreise auf den Seitentheilen der Netzhaut hätte man alsdann dadurch zu erklären, dass man annimmt, dass immer nur eine ganze Gruppe von reizbaren Elementen

1 Siehe z. B. Handbuch der gesammten Augenheilkunde III. 1. Theil. Leipzig 1874. Eidoptometrie von Snellen & Landolt.

nur mit je einem Elemente des Nervensystems in Verbindung steht, dessen Erregungszustand in der inneren Anschauung als individuelle von anderen unterschiedbare Empfindung auftritt. Man könnte etwa daran denken, dass immer je ein Zapfen mit der ihn umgebenden Stäbchengruppe mit je einem empfindenden Elemente verbunden ist, einen Empfindungskreis bildet. Das Bewusstsein könnte alsdann nicht unterscheiden, ob diese oder jene oder ob alle Elemente dieser Gruppe gereizt sind.

Die vorstehend entwickelte Annahme, dass die äusserste Schicht der Netzhaut die reizbaren Elemente führt, hat vom teleologischen Gesichtspunkte aus etwas widerstrebendes, wenn man bedenkt, dass die Lichtstrahlen erst eine Reihe von Schichten nervöser Elemente durchsetzen müssen, ehe sie die beabsichtigte Wirkung hervorbringen. Die Gründe für die Annahme sind aber so zwingender Art, dass man den scheinbaren Widerspruch gegen die sonst allgemein vorausgesetzte Zweckmässigkeit hinnehmen muss.

Gewichtiger dürfte ein anderes Bedenken gegen die Annahme sein, dass die eigentlichen Stäbchen und Zapfen im engeren Sinne des Wortes die reizbaren Elemente sind, das sich gleichfalls vom teleologischen Standpunkte aus machen lässt. Die Körper der Stäbchen und Zapfen, insbesondere deren Aussenglieder die neuere Histologen besonders gern als die Angriffspunkte des Reizes ansehen, stehen an Durchsichtigkeit kaum hinter den übrigen Theilen der Netzhaut zurück. Von einer durch Licht reizbaren Substanz muss man aber offenbar einen gewissen Grad von Undurchsichtigkeit verlangen. In der That, wenn an einer Stelle eines Mediums ein Zug von Aetherwellen eine chemische oder thermische Wirkung ausüben soll, so muss diese Stelle so beschaffen sein, dass nicht die gesammte kinetische Energie der ankommenden Oscillationen auf die angrenzende Schicht als solche übertragen wird, d. h. die Stelle muss etwas von dem auffallenden Lichte absorbiren. Wenn neuerdings der Plättchenstruktur [1] der Aussenglieder von Stäbchen und Zapfen die Aufgabe zugeschrieben ist durch Interferenz auffallender und reflektirter Strahlen dies Zurückbehalten von Oscillationsenergie zu bewirken, so dürfte dies auf ein Missverständniss der Interferenz hinauslaufen. Das was man in der physikalischen Lehre von den Strahlungen Absorption nennt, ist zur Erklärung von Wirkungen auf die ponderabelen Stoffe gar nicht zu umgehen.

Nun kann man freilich daran erinnern, dass es sich hier nur

1 Siehe Seite 146.

um die Arbeit handelt, welche zum Auslösen stärkerer (chemischer) Kräfte erforderlich ist, die ihrerseits hernach unvergleichlich mehr Arbeit leisten als zu ihrer Auslösung gehörte. Dazu könne vielleicht schon der 100. Theil der Energie der auffallenden Strahlung genügen, während $^{99}/_{100}$ als solche weiter fortgepflanzt würden. Hiergegen lässt sich aber einmal einwenden, dass die von den Strahlen in der reizbaren Netzhautschicht zu leistende Arbeit denn doch nicht eine so einfache Auslösungsarbeit sein kann, wie etwa das Ausheben des Sperrhakens aus einem Uhrwerke, da die von den ausgelösten Kräften geleistete Erregungsarbeit der auslösenden Reizarbeit innerhalb weiter Grenzen ziemlich genau proportional ist. Andererseits ist schon früher hervorgehoben, welchen ungeheuer kleinen Werth die ganze Energie einer Strahlung zu besitzen braucht, um eine sehr merkliche Wirkung hervorzubringen. Wenn wir in dichtem Waldesschatten bei mässigem Mondschein ein gelbes Blatt am Boden sehen, sollen wir da wirklich annehmen, dass nur ein ganz kleiner Bruchtheil von der Energie der Strahlung dieses Blattes, der von der reizbaren Schicht eben absorbirt wird genügt, die Erregungsarbeit auszulösen, während vielleicht $^{99}/_{100}$ der Strahlung unbenutzt weiter gehen, um erst im todten Pigmente absorbirt zu werden?

Das Paradoxe aller dieser Consequenzen zugebend könnte man einwenden: Die photographisch empfindlichen Stoffe sind ja auch meist durchsichtig und es genügt auch bei ihnen der ganz kleine absorbirte Bruchtheil der Strahlung, die chemische Arbeit zu leisten. Dieser Einwand trifft aber die Sache nur scheinbar, die photographisch empfindlichen Substanzen reagiren ja in der That auf das stark sichtbare Licht vom Roth bis zum Blau, das sie fast ungeschwächt durchlassen, nur sehr schwach und stark auf die ultravioletten Strahlen, die vielleicht vollständig von ihnen absorbirt werden. Die reizbare Substanz der Netzhaut dagegen reagirt am stärksten auf das sichtbare Licht, das eben hierdurch zum sichtbaren wird und dieses muss also am meisten von ihr absorbirt werden, oder wenigstens hat die etwaige Absorption unsichtbarer Strahlen für die Erregung keine Bedeutung.

Nach Allem diesem muss es höchst auffällig erscheinen, dass die allgemein als die durch Licht reizbare angesprochene Substanz durchsichtig ist. Ganz so durchsichtig, wie man früher anzunehmen pflegte sind zwar keineswegs die reizbaren Schichten der Netzhaut, denn sie erscheinen im durchfallenden Lichte oft purpurroth, absorbiren also in der That einen sehr merklichen Bruchtheil des bekanntlich gerade sehr stark reizend wirkenden grünen und gelben Lichtes.

Mir scheint aber selbst diese Absorption noch nicht genügend, um die Reizbarkeit durch die schwächsten Strahlungen erklärlich zu finden und ich würde mich nicht wundern, wenn über kurz oder lang nachgewiesen würde, dass die stark pigmentirten und daher stark absorbirenden Anhangsgebilde der Stäbchen und Zapfen die eigentlichen Angriffspunkte des Lichtreizes sind. Eine Stütze dieser Vermuthung finde ich in der von Alters her bei den Zoologen bestehenden Neigung stark pigmentirte mit Nervenenden versehene Flecken an der Oberfläche niederer Thiere ohne Weiteres für Licht percipirende Organe zu erklären.

DRITTES CAPITEL.

Qualität der Lichtempfindungen.

I. Allgemeine Betrachtungen.

Die Physiologie als Naturwissenschaft sollte eigentlich lediglich auf dem Standpunkte der äusseren Anschauung stehen d. h. sich mit den Vorgängen am Organismus beschäftigen sofern sie einem fremden Beobachter erscheinen. Diesem können sie aber nur erscheinen als Bewegungen der materiellen Theilchen verursacht durch die Kräfte, mit welchen dieselben auf einander wirken oder mit welchen andere materielle Theilchen auf jene einwirken. So sind wir denn auch bis jetzt im Grossen und Ganzen verfahren indem wir die Aetheroscillationen nach den Grundsätzen der Mechanik in den durchsichtigen Medien des Auges verfolgten und schliesslich wahrscheinlich zu machen suchten, dass diese Oscillationen in der hintersten Netzhautschicht Bewegungen oder Umlagerungen der ponderabelen Theilchen verursachten. Wollten wir nun auf diesem Wege weiter gehen, so wäre zu untersuchen, wie sich von den zunächst chemisch — das ist doch immer im weiteren Sinne des Wortes mechanisch — in Bewegung gesetzten Körper ein weiterer Bewegungsvorgang nämlich der nervöse Erregungsprocess längs gewisser Leitungsbahnen fortpflanzt. Wir müssten diesen Leitungsbahnen ins Nervencentralorgan folgen und würden etwa finden wie sich da dem in Rede stehenden Processe labyrinthisch verschlungene Bahnen eröffneten, wie er hier bleibende Veränderungen hervorruft, wie er vielleicht dort erlischt unter

dem Einflusse von Widerständen, wie er nach anderen Orten vielleicht noch unterstützt durch ähnliche von anderen Seiten kommende Processe kräftig weiter schreitet und zuletzt auf einer motorischen Bahn zu einer Muskelgruppe gelangt, in welcher er wieder neue Molekularkräfte auslöst deren Wirkung eine äussere Arbeit ist.

Diese eigentlich naturwissenschaftliche Zergliederung der weiteren Wirkungen der Lichtstrahlen im Organismus kann aber bei dem heutigen Stande unserer Kenntnisse vom Wesen der Nervenerregung und vom anatomischen Zusammenhange der nervösen Elemente gar nicht einmal versucht werden. Wir müssen daher, wenn wir den Wirkungen des Lichtes überhaupt noch weiter nachgehen wollen, als bisher geschehen ist, nothwendig den Standpunkt der äusseren Anschauung verlassen, und uns auf den Standpunkt des Subjektes stellen, dessen Auge von den Lichtstrahlen getroffen wird. Dies gilt nicht nur beim Gesichtssinne, sondern auf allen Sinnesgebieten. Sowie die Zergliederung der Erscheinungen über das allererste, was bis zur und bei der Reizung der Nervenenden objektiv zu beobachten ist, hinausgehen soll, so muss man sich auf den subjektiven oder auf den Standpunkt der inneren Anschauung stellen, und hat dies auch stets gethan, so lange eine wissenschaftliche Untersuchung der Sinne getrieben wird.

In dem Bewusstsein des Subjektes, dessen Sinnesnervenenden gereizt werden, tritt der Zustand ein, den wir eine „Empfindung“ nennen. Es kann nicht genug eingeschärft werden, dass Empfindung wie Bewusstsein überhaupt lediglich Gegenstände der inneren Anschauung sind. In einem von aussen angeschauten Naturkörper ist Bewusstsein oder ein bestimmter Empfindungszustand desselben gar nie wahrzunehmen und sei dieser Naturkörper auch ein lebender menschlicher Körper. Je genauer man die Vorstellung von einem solchen äusseren Körper wissenschaftlich ausbildet, um so mehr löst sie sich auf in die eines Aggregates von materiellen Theilchen, welche rein mechanisch auf einander wirken. Die Annahme, ein fremder Naturkörper könne oder müsse die Erscheinungsform eines dem unsrigen ähnlichen Bewusstseins sein, beruht lediglich auf der Bemerkung, dass die gesehenen Bewegungen des fremden Körpers grosse Aehnlichkeit haben mit den uns ebenfalls auch objektiv erscheinenden Bewegungen des eigenen Körpers, welche unsere Empfindungen begleiten.

Durchmustern wir nun unsere Empfindungen wie sie sich uns im Verlaufe der Zeit auf den verschiedenen Sinnesgebieten in unendlicher Mannigfaltigkeit darbieten, so lässt sich vor Allem bemerken,

dass diese mehr jene weniger die Aufmerksamkeit an sich zieht und andere von derselben ausschliesst. Dies mehr oder weniger giebt der Empfindung den Charakter der mathematischen Grösse. Ja es lässt sich behaupten, dass die Empfindung oder genauer gesagt die Intensität, mit welcher sie sich im Bewusstsein geltend macht, das eigentliche Vorbild der mathematischen Grösse ist. Beruht doch die Grössenschätzung in allen Erfahrungsgebieten auf der Vergleichung von Empfindungsintensitäten. Hiervon ist die Schätzung räumlicher Ausdehnungen nicht auszunehmen, da sie höchst wahrscheinlich in der Vergleichung von Empfindungen beruht, welche die Muskelbewegungen begleiten. Bloss die Vorstellung von der Grösse einer Anzahl dürfte auf einem anderen Grunde ruhen nämlich auf der Fähigkeit zu verschiedenen Zeiten auftretende Empfindungen von einander in der Erinnerung schlechthin als individuell verschieden zu erkennen.

Bei weiterer Zergliederung unserer Empfindungen gewahren wir aber, dass solche auch noch dann möglicherweise unterschieden werden können, wenn sie an Intensität einander völlig gleich sind. Z. B. unterscheiden wir eine Schallempfindung von einer Lichtempfindung. Es giebt also ausser der quantitativen noch eine wesentlich andere Art der Unterscheidung von Empfindungen, die man etwa als eine „qualitative“ bezeichnen könnte, wenn auch mit diesem Ausdrucke nichts über das Wesen der Sache ausgesagt ist. Nach den jetzt — und wohl mit Recht — herrschenden Anschauungen vom Zusammenhange der Bewusstseinszustände mit Vorgängen im Nervensysteme wird man mit apodiktischer Gewissheit den Satz aussprechen können, dass zwei Empfindungen nur dann qualitativ unterscheidbar sind, wenn individuell verschiedene Elemente des Nervensystems erregt sind. Mit andern Worten die wiederholte Erregung desselben Nervenelementes kann nur eine Wiederholung desselben Zustandes des Bewusstseins zur Folge haben an dem lediglich verschiedene Grade unterscheidbar sind. Eine andere als eine rein quantitative Unterscheidung der Empfindungen kann bei wiederholter Reizung desselben Nervenelementes nie stattfinden. Werden dagegen gleichzeitig oder nacheinander verschiedene Elemente gereizt, so macht sich eben jener ganz anders geartete Unterschied der Empfindungen im Bewusstsein geltend, der gar keine Analogie mit einem Unterschiede des Grades hat. Gehören die beiden Nervenelemente einem Sinnesgebiete an, bei welchem es durch Bewegung des Organes leicht möglich ist bald dies bald jenes Element demselben Reize darzubieten, so tritt der in Rede stehende nicht quantitative Unterschied im Bewusstsein auf als Vorstellung einer verschiedenen Oertlichkeit im Raume. Dies gilt

in ganz ausgezeichneter Weise bekanntlich vom Tastsinne und vom Gesichtssinne.

Wesentlich anders gestaltet sich die Sache bei einem Sinnesorgane, wo wir es nicht in der Gewalt haben durch Bewegungen bald den einen bald den anderen Theil der Nervenperipherie dem Reize darzubieten. Hier ist keine Gelegenheit, die einzelnen unterscheidbaren Empfindungen, welche den Reizungen der verschiedenen Elemente entsprechen, verknüpfen zu lernen mit Ortsvorstellungen, welche mit Hülfe von Bewegungsempfindungen in die Raumanschauung hineinkonstruirt sind. Die Erregung der individuell verschiedenen Nervenelemente eines solchen Sinnesgebietes kann daher nicht mit der Vorstellung einer verschiedenen Oertlichkeit verbunden sein, obwohl die gereizten Nervenelemente objektiv betrachtet wirklich an verschiedenen Orten liegen. Davon kann aber aus dem angeführten Grunde das subjektive Bewusstsein keine Kenntniss haben. Hier bedingt vielmehr die individuelle Verschiedenheit der erregten Elemente einen rein qualitativen Unterschied des Empfindens im Gegensatze zum lokalen. Welche Elemente einer so gelagerten Sinnesnervenperipherie im einzelnen Falle gereizt werden, das wird nun nicht abhängen von der Richtung, aus welcher der reizende Vorgang herkommt, sondern nur etwa noch von der besonderen Beschaffenheit desselben, indem die verschiedenen Nervenenden mit verschieden gearteten Gebilden in Zusammenhang stehen, von denen die einen durch diesen die andern durch jenen Vorgang vorzugsweise in Thätigkeit gesetzt werden.

Organe der beschriebenen Art sind sehr wahrscheinlich das Gehör- und das Geruchsorgan. Was das erstere betrifft, so ist bekanntlich eine von Helmholtz fein ausgebildete Theorie seiner Funktion in weiten Kreisen anerkannt, mit welcher die soeben entwickelten Grundsätze in vollem Einklang sind. Aehnlich wird man beim Geruchsorgan anzunehmen haben, dass je nachdem der eine oder der andere Riechstoff mit der Riechschleimhaut in Berührung kommt, bald mehr die einen bald mehr die anderen Nervenfasern erregt werden, dass aber gleichwohl nur qualitativ und nicht lokal verschiedene Empfindungen entstehen, weil jedem Reiz an sich die ganze Nervenperipherie zugänglich ist, und wir es durchaus nicht in der Gewalt haben, bald den einen bald den anderen Theil derselben dem Reize auszusetzen.

Zwischen diesen Sinnen und den geometrischen Sinnen steht das Geschmacksorgan, wo der Reiz durch willkürliche Bewegungen lokalisirt werden kann, wo aber ausserdem noch Vorrichtungen gegeben zu sein scheinen, vermöge deren je nach der Natur des Reizes bald

diese bald jene räumlich nahe benachbarte Elemente vorzugsweise angesprochen werden. Hier unterscheiden wir auch in der That sowohl lokal als auch im engeren Sinne des Wortes qualitativ.

Die Mannigfaltigkeit qualitativer Unterschiede zwischen den Empfindungen eines Sinnesgebietes wird nun noch weit über die blosse Anzahl der individuellen Nervenelemente hinaus gesteigert durch die Combination verschiedener Elementarempfindungen zu Gruppen, welche im Bewusstsein zu mehr oder weniger unauflöslichen Einheiten zusammengefasst werden. Die beste Erläuterung dieses Satzes bietet der Tastsinn. Wir wollen zwei Elemente desselben betrachten und annehmen, die Reizung jedes Einzelnen davon führe zu Empfindungen, die, abgesehen vom qualitativen und lokalen, keinen weiteren Unterschied erkennen liessen. Nun fassen wir aber den Zustand des Bewusstseins (die Doppelempfindung) ins Auge, welche entsteht, wenn beide Elemente gleichzeitig gereizt werden, dann eröffnet sich, abgesehen vom quantitativen Werthe und der begleitenden Ortsvorstellung die Aussicht auf eine unendliche Mannigfaltigkeit dieser Doppelempfindung indem denkbar ist, dass sich jeder Grad der einen Elementarempfindung mit jedem Grade der anderen kombiniren lässt. Noch grösser wird die Mannigfaltigkeit, wenn wir Gruppen aus mehr als zwei Elementen bilden, wie sie bei wirklichen Reizungen des Tastsinnes meist gegeben sind. So haben wir z. B. in der That ganz verschieden geartete Empfindungen, wenn wir dieselbe Fingerspitze das eine Mal an eine glatte das andere Mal an eine rauhe Oberfläche anlegen, offenbar weil im ersteren Falle alle betheiligten Elemente ziemlich gleich stark erregt sind im anderen Falle aber zwischen stark erregten Elementen schwach erregte in gewisser Weise vertheilt sind. Dass auch die Unterscheidung der sogenannten Wärme- und Kälteempfindung auf dasselbe hinausläuft, nämlich auf den Charakter der Gruppirung zahlreicher an sich übereinstimmender Empfindungselemente, habe ich vor vielen Jahren bereits experimentell erwiesen Das wesentliche der Beweisführung besteht darin, dass, wenn man nur möglichst wenige Hautnervenfasern reizt, so dass kein Charakter der Gruppirung verschieden starker Empfindungen mehr erkennbar ist, auch nicht mehr unterschieden werden kann, ob die Reizung durch Wärmestrahlung oder durch Berührung geschah. An eine principiell andere Erklärung des Unterschiedes zwischen Temperaturempfindungen und der Druck- oder Berührungsempfindungen kann wohl kaum gedacht werden, denn dass durch leise Berührung und durch Temperaturänderung der obersten Hautschichten ganz dieselben Nervenenden angesprochen werden, kann schwerlich in Zweifel gezogen

werden. Es geht dies namentlich aus der Thatsache hervor, dass breite Hautnarben des Temperaturgefühls und des Berührungsgefühles entbehren, wohl aber noch Empfindlichkeit für stärkere Druckgrade besitzen, die offenbar auch auf tiefer im Gewebe sitzende Nervenenden wirken.

Der ganzen vorstehenden Erörterung liegt — und dies mag noch einmal ausdrücklich hervorgehoben werden — die Vorstellung zu Grunde, dass die Unterscheidbarkeit gleich starker durch verschiedene Nervenindividuen vermittelter Empfindungen nicht etwa bedingt ist durch die verschiedene chemische Beschaffenheit der beiden Nervenindividuen sondern auf der blossen numerischen Verschiedenheit derselben, womit jeder Erklärungsversuch ohne weiteres ausgeschlossen ist. Um diesen Gedanken noch deutlicher hervortreten zu lassen, wollen wir uns vorstellen zwei lebende menschliche Körper stimmten in einem Augenblicke Atom für Atom überein nicht nur was die gegenseitige Lage, sondern auch was Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit betrifft. Hier würden wir es ohne Zweifel doch noch mit zwei numerisch verschiedenen Personen zu thun haben, deren jede ihr eigenes Bewusstsein hätte. Auf dasselbe Princip gründen wir die Unterscheidbarkeit der Bewusstseinszustände, wenn zwei numerisch verschiedene Nervenindividuen — mögen sie verschiedenartig oder gleichartig sein — gereizt sind. Es ist dies — wie mir scheint — der konsequent durchgeführte Gedanke der „specifischen Energieen", welcher seit J. Müller ein Grundpfeiler der Physiologie der Sinne geworden ist.

Wir hätten somit eigentlich jedem individuellen Nervenelemente eine besondere specifische Energie zuzuschreiben. Nun zeigt sich aber thatsächlich der Unterschied zwischen zwei Bewusstseinszuständen nicht immer gleich gross, wenn zwei Nervenelemente erregt werden. Es ist vielmehr nach allgemeiner Meinung der Unterschied in der Empfindungsqualität bedeutend grösser, wenn zwei Nervenelemente erregt sind, von denen eines dem acusticus und eines dem opticus angehört als wenn die beiden Nervenelemente solche des opticus sind. Die gegenwärtig herrschende Ansicht über diesen wichtigen Punkt der Sinnesphysiologie hat sehr klar Helmholtz[1] ausgesprochen indem er sagt:

„Zwischen den Sinnesempfindungen verschiedener Art kommen „zwei verschiedene Grade des Unterschiedes vor. Der am tiefsten „eingreifende ist der Unterschied zwischen Empfindungen, die ver-

[1] Helmholtz, Die Thatsachen in der Wahrnehmung. S. 8 u. 9. Berlin 1879.

„schiedenen Sinnen angehören, wie zwischen blau, süss, hochtönend, „ich habe mir erlaubt diesen als Unterschied in der „Modalität“ „der Empfindung zu bezeichnen. Er ist so eingreifend, dass er jeden „Uebergang vom einen zum anderen, jedes Verhältniss grösserer oder „geringerer Aehnlichkeit ausschliesst. Ob z. B. süss dem Blau oder „Roth ähnlicher sei, kann man gar nicht fragen. Die zweite Art des „Unterschiedes die minder eingreifende, ist die zwischen verschiede- „nen Empfindungen desselben Sinnes. Ich beschränke auf ihn die „Bezeichnung des Unterschiedes der Qualität. J. G. Fichte fasst „diese Qualitäten je eines Sinnes zusammen als Qualitätenkreise und „bezeichnet, was ich eben Unterschied der „Qualität“ nannte als „Unterschied der Qualitätenkreise. Innerhalb jedes solchen Kreises „ist Uebergang und Vergleichung möglich. Von Blau können wir „durch Violett, Carminroth in Scharlachroth übergehen und z. B. aus- „sagen, dass Gelb dem Orangeroth ähnlicher sei als dem Blau.“

Die hier als unmittelbar im Bewusstsein gegeben angenommenen Thatsachen kann ich nicht als solche anerkennen. Es giebt unzweifelhaft Fälle, wo zwischen Empfindungen verschiedener Sinnesgebiete ebenso stetige Uebergänge möglich sind wie zwischen Blau und Roth durch Violett und Purpur. Die brennende Empfindung z. B. welche der Pfeffer auf der Zunge erzeugt gehört bekanntlich entschieden dem Tastsinne an, während die Empfindung, welche Kochsalzlösung daselbst hervorbringt eine Geschmacksempfindung ist. Nun wird aber Niemand zweifeln, dass man einen vollkommen stetigen Uebergang zwischen diesen beiden zweien Sinnesgebieten angehörigen Empfindungen (denen nach Helmholtz's Bezeichnungsweise verschiedene Modalität zukommt) herstellen könnte, wenn man eine Reihe von Gemengen aus Pfefferextrakt und Kochsalzlösung nacheinander auf die Zunge brächte, in denen der Gehalt am einen Bestandtheil von 0 bis 1 variirte. Auch würden ohne Zweifel unter den verschiedenen so erzeugten Gesammtempfindungen einige mehr andere weniger von einander verschieden erscheinen.

Die allerdings nicht wegzuleugnende Thatsache des Bewusstseins, dass im Allgemeinen die Empfindungen desselben Sinnesgebietes einen gemeinsamen Charakter zeigen, ist hiernach vielleicht doch nicht ebenso ursprünglich und geheimnissvoll wie die Thatsache dass die Erregung zweier individuell verschiedener Nervenelemente überhaupt zu unterscheidbaren Empfindungen führt. Das Gemeinsame der Empfindungen desselben Sinnes könnte vielmehr erst das Resultat der Gewöhnung im Lebenslaufe des Einzelnen oder der Species sein, die Empfindungen eines Sinnes in verschiedenen Intensitätsgraden sehr

oft gleichzeitig erregt zu finden. In der That sahen wir ja, dass einzelne Empfindungen eines Sinnes sich durch solche Gewöhnung dem Qualitätenkreise eines anderen im Bewusstsein einordnen können, wie z. B. die Gefühlsempfindungen der Zunge den Geschmacksempfindungen. Eine quantitative Vergleichung der Aehnlichkeit verschiedener Empfindungen ist vielleicht überhaupt nur möglich wenn die verglichenen Empfindungen Gemische mehrerer Elementarempfindungen sind, und die Aehnlichkeit eben darauf beruht, dass gemeinsame Elemente vorhanden sind. Sei dem nun, wie ihm wolle, die Wahrheit muss vor allem klar ins Auge gefasst werden, dass am allerwenigsten daran gedacht werden kann, die Verschiedenheit des Charakters der Empfindung aus der Verschiedenheit der normalen adäquaten Reizungsart der verschiedenen Sinne zu erklären. Am deutlichsten zeigt sich die Unhaltbarkeit dieser so zu sagen naiven Anschauung gerade auf dem Gebiete des Gesichtssinnes. Hier nämlich ist es leicht durch mechanischen Druck oder durch elektrische Ströme Sinnesnervenelemente zu reizen und es soll von diesen Reizungen in einem späteren Abschnitte ausführlicher gehandelt werden. Reizt man auf solche nicht adäquate Weise Theile des Sehnervenapparates so kommen bekanntlich stets Lichtempfindungen zu Stande, die sich in ihrem Charakter und Wesen durchaus nicht von solchen unterscheiden, welche durch Strahlung hervorgerufen werden, ein Beweis, dass die Natur der Lichtempfindung mit der Strahlung in keinem nothwendigen ursächlichen Zusammenhange steht, sondern nur dadurch bedingt wird, dass eben Elemente des Gesichtssinnes erregt sind.

II. Die homogenen Farben.

Nachdem durrh die vorstehenden allgemeinen Betrachtungen der Gesichtspunkt festgestellt ist, unter welchem wir die nicht quantitative Unterscheidung von Empfindungen betrachten, wollen wir uns mit der Unterscheidung der Lichtempfindungen und ihrem Zusammenhange mit der verschiedenen Reizungsart der Sehnervenenden beschäftigen. Es fällt vor Allem auf, dass je nachdem diese oder jene Gegend der Netzhaut gereizt wird, die Lichtempfindung einen verschiedenen lokalen Charakter bekommt, d. h. vom Bewusstsein die angenommene Ursache der Empfindung in diese oder jene Gegend des Raumes versetzt wird. Eine weitere Verfolgung der lokalen Unterscheidung der Lichtempfindungen soll hier aber nicht unternommen werden, da dieselbe den Gegenstand eines besonderen Abschnittes dieses Werkes ausmacht, der von der Bildung der Ge-

sichtsvorstellungen handelt. Wenn aber dieselbe Gegend der Netzhaut verschiedene Male gereizt wird, so kann immer noch das Bewusstsein in wesentlich verschiedene Zustände des Lichtempfindens kommen, obwohl die Ursache am selben Orte vorgestellt wird, gerade so wie eine verschiedene Tastempfindung trotz lokaler Uebereinstimmung entsteht, wenn wir mit derselben Fingerspitze einmal einen rauhen einmal einen glatten Körper berühren.

Die so noch qualitativ unterscheidbaren Lichtempfindungen pflegt man schon in der Sprache des gemeinen Lebens durch die *Farbennamen* zu unterscheiden. Wir wollen zuerst die Mannigfaltigkeit der Farbenempfindungen durchmustern, welche uns bei Reizung der dem Pole benachbarten Netzhauttheile dargeboten wird. Die erste Thatsache, welche sich uns hier schon in der blossen Phantasie darbietet ist, dass diese Mannigfaltigkeit ganz abgesehen von der quantitativen eine unendliche ist, denn zwischen jede zwei verschiedene Farbenempfindungen, z. B. roth und blau kann man ohne die Intensität zu ändern, in stetiger Reihenfolge unendlich viele Zwischenstufen einschalten. Es ist für das Verständniss dieses Satzes, sowie für die weiteren Folgerungen wichtig sich vollkommen darüber klar zu werden, dass die Intensität *verschiedener* Farbenempfindungen ebensowohl quantitativ vergleichbar ist als die Intensität *gleichartiger*, und dass es namentlich immer möglich ist z. B. einer Blauempfindung von bestimmter Intensität eine Rothempfindung von genau gleicher Intensität oder „*Helligkeit*“ an die Seite zu stellen. Dies faktisch auszuführen hat freilich oft grosse Schwierigkeit, weil das Urtheil über das Verhältniss der Intensitäten verschiedenartiger Farbenempfindungen sehr unsicher ist. Uebrigens ist diese Unsicherheit wohl kaum grösser als die der Beurtheilung, welcher von zwei verschiedenen Tönen lauter gehört wird, und doch steht niemand einen Augenblick an, solche Urtheile über die Intensität verschiedener Tonempfindungen täglich hunderte von Malen auszusprechen. Ganz ebenso fällt der unbefangene Mensch derartige Urtheile über die Helligkeit verschiedener Farben, oft sogar mit numerischer Bestimmung des Verhältnisses, indem er z. B. sagt, dies Roth ist wenigstens 10 mal so hell als jenes Blau. Mögen auch solche numerische Angaben in der Regel irrthümlich sein, so liegt doch in ihnen die Anerkennung des in Rede stehenden Principes. Um gar keinen Zweifel mehr übrig zu lassen, stellen wir folgende Ueberlegung an. Wir legen neben ein weisses ein rothes Blatt Papier in gleiche mässige Schattenbeleuchtung; hier wird kein normal sehender Mensch im Zweifel sein, dass das Auge von dem Lichte des weissen Papieres

stärker afficirt ist, oder dass die Weissempfindung stärker ist als die Rothempfindung. Legt man jetzt das rothe Papierblatt in den Sonnenschein während das weisse liegen bleibt, so wird ebensowenig ein Zweifel darüber aufkommen können, dass nunmehr die Rothempfindung stärker ist. Da aber vom zweiten stärkeren Intensitätsgrade der Rothempfindung zu dem ersteren schwächeren ein stetiger Uebergang durch alle Zwischenwerthe möglich ist, so muss es nothwendig darunter einen Grad der Rothempfindung geben, welcher jenem Grade des Weissempfindens genau gleich ist. Wir haben demnach ganz entschieden die Berechtigung uns alle denkbaren Farbenempfindungen in gleicher Intensität vorzustellen und die Mannigfaltigkeit der Qualität ganz für sich ohne alle Einmischung der quantitativen Unterschiede zu betrachten.

Es wird vor Allem zu untersuchen sein, ob vielleicht ähnlich wie auf dem Gebiete des Gehörsinnes bei normaler Reizungsart und normaler Erregbarkeit des Nervenapparates im Allgemeinen jede besondere Farbenempfindung einer besonderen physikalischen Beschaffenheit des Reizes entspricht. Zu diesem Ende ist es gut zunächst den adäquaten Reiz in seinen einfachsten Formen auf das Auge wirken zu lassen und zu sehen, wie geartete Lichtempfindungen alsdann entstehen. In diesen einfachsten Formen bietet uns aber die Natur jenen Reiz nur ausnahmsweise dar. Bei den von leuchtenden oder beleuchteten Naturkörpern ausgehenden Strahlen ist im Gegentheil jeder einzelne Strahl in der Regel ein Gewirre von Aetheroscillationen der verschiedensten Schwingungszahlen und es bedarf daher künstlicher Vorrichtungen um eine Netzhautstelle mit einer Strahlung zu reizen, die einem möglichst einfachen pendelartigen Schwingungszustand entspricht. Einen Strahl aber auf dem sich nur ein einfacher pendelartiger Schwingungszustand fortpflanzt, nennt man bekanntlich in der Physik einen homogenen Lichtstrahl. Dahingegen nennt man einen gemischten Lichtstrahl einen solchen, längs dessen sich gleichzeitig mehrere pendelartige Schwingungen fortpflanzen, deren Schwingungszahlen in der Zeiteinheit verschieden sind. So ist z. B. ein Sonnenstrahl bekanntlich ein sehr gemischter unter dessen Componenten fast alle Schwingungszahlen vertreten sind, die grösser als 370 Billionen und kleiner als 900 Billionen in der Sekunde sind. Die Physik liefert uns nun verschiedene Mittel einen beliebig gemischten Strahl in seine einfachen Componenten fächerartig auszubreiten, so dass sich in verschiedenen Richtungen lauter homogene Strahlen fortpflanzen. Das einfachste und darum gebräuchlichste Mittel zu diesem Zwecke ist die Brechung in einem Prisma aus einer stark

zerstreuenden Substanz. Bei der grossen Wichtigkeit, welche die Herstellung möglichst vollständig reines homogenes Lichtes für die physiologische Optik hat, möge hier kurz das Verfahren, ein sogenanntes reines prismatisches Spektrum zu erzeugen, in Erinnerung gebracht werden.

Man verschafft sich eine feine leuchtende Linie, indem man einen feinen Spalt in der senkrechten Wand eines sonst ganz dunklen Raumes durch eine hinlänglich helle und hinlänglich ausgedehnte Lichtquelle, z. B. durch ein Spiegelbild der Sonne beleuchtet, so dass durch jeden Punkt des Spaltes von den verschiedenen Punkten der Lichtquelle ein Strahl geht und man also hinter dem Spalt ein Strahlensystem hat, welches genau so beschaffen ist, als ob der Spalt aus selbstleuchtenden Punkten bestände. In diese Strahlung stellt man nun in einiger Entfernung in gleicher Höhe mit dem Spalte ein

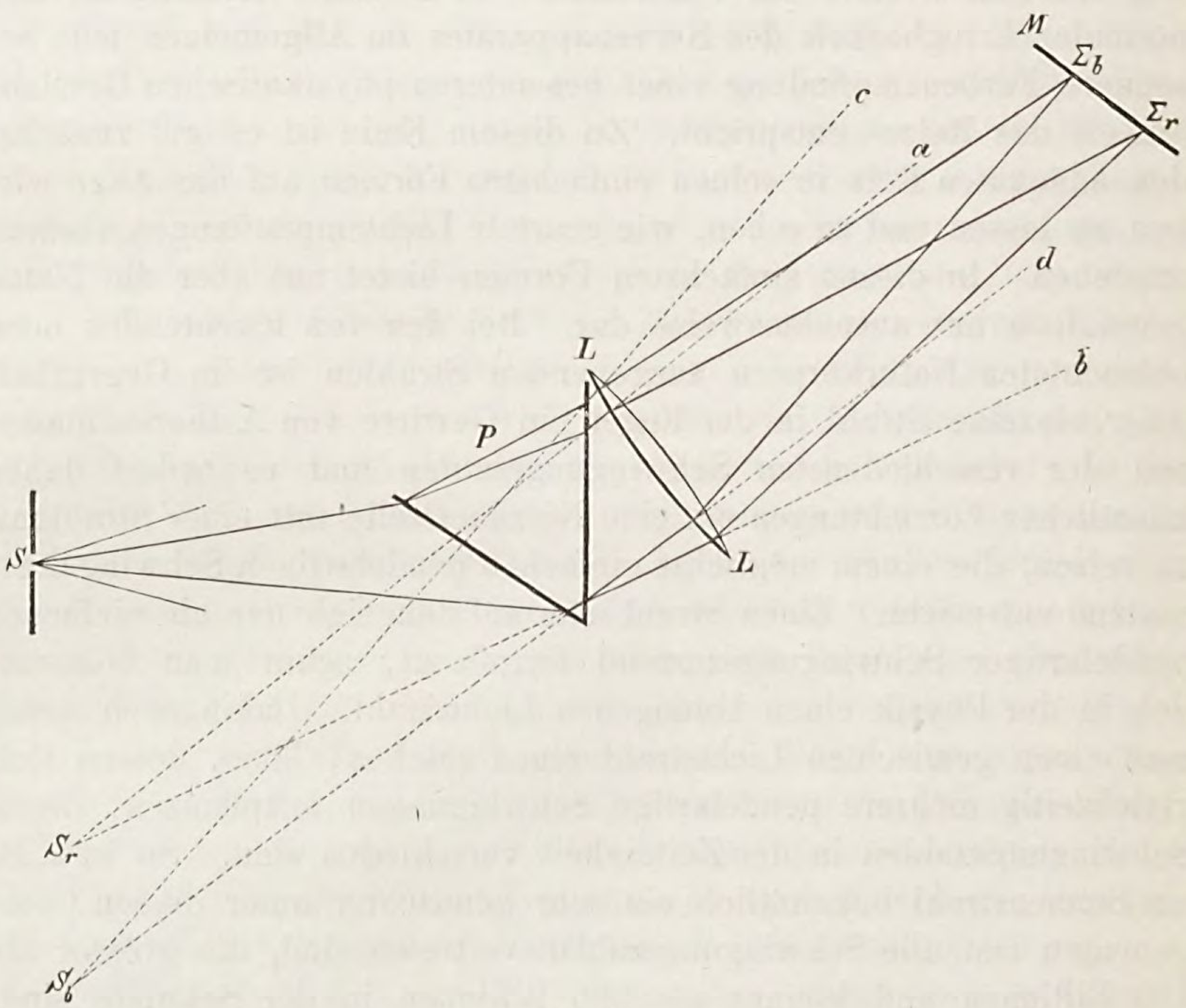


Fig. 47.

Prisma aus stark zerstreuendem Stoffe die brechende Kante senkrecht wie es in Fig. 47 im Grundriss dargestellt ist. Fassen wir nun eines der Strahlenbündel, welches vom Punkte S des Spaltes ausgeht ins Auge. Jeder Strahl desselben besteht, wenn es ein Son-

nenstrahl ist aus unzähligen, denselben Weg verfolgenden Strahlen von verschiedener Schwingungszahl. Da aber diesen verschiedene Brechungsindices zukommen, so werden ebensoviele Strahlenbündel aus dem Prisma ausfahren, als verschiedene Schwingungszahlen vertreten sind. Eines z. B. dessen Strahlen die Schwingungszahl 450 Billionen in der Sekunde zukommt, wird wenig abgelenkt und so weiter gehen, als wären seine Strahlen sämmtlich ungefähr vom Punkte S_r ausgegangen. $S_r a$ und $S_r b$ wären also die Richtungen der beiden äussersten Strahlen dieses Bündels. Diese beiden Linien sind aber nur zwischen Prisma und Linse ausgezogen, weil sie nur hier als physische Strahlen bestehen. Ein anderes mit der Schwingungszahl 700 Billionen wird stärker gebrochen und sich so vom Prisma aus fortpflanzen als wäre es vom Punkte S_b ausgegangen. Die Richtungen der beiden äussersten Strahlen dieses Bündels sind $S_b c$ und $S_b d$ in Fig. 47. Die virtuellen Ausgangspunkte der Strahlenbündel von zwischenliegender Schwingungszahl liegen natürlich zwischen den Punkten S_r und S_b in stetiger Reihenfolge. Stellt man jetzt hinter das Prisma eine Linse L, so bringt dieselbe, wenn ihr Abstand von den Punkten S_r und S_b grösser als ihre Brennweite ist, die einzelnen von diesen Punkten aus divergirenden Strahlenbündel zur Convergenz und zwar wenn die Linse eine achromatische ist, alle in ziemlich derselben Entfernung. Stellt man in dieser Entfernung einen Schirm auf, so entstehen also auf demselben ebenso viele Bilder des Punktes S nebeneinander als Strahlenarten verschiedener Schwingungszahl in der Strahlung von S vertreten sind. Ein Bild Σ_b welches den Strahlen von grosser Schwingungszahl entspricht, liegt weiter ab von der verlängerten Richtung SP als ein Bild Σ_r, welches einer Strahlenart von kleinerer Schwingungszahl entspricht. Denn Σ_b ist das Bild des scheinbaren Objektpunktes S_b und Σ_r das des Objektpunktes S_r. Ebenso wie der Punkt S werden sich aber auch die darüber und darunter liegenden Punkte des Spaltes verhalten. Auf dem Schirm M wird also eine senkrechte Linie, welche bei Σ_r die Ebene der Zeichnung schneidet, ausschliesslich von Strahlen beschienen sein, die der Schwingungszahl 450 Billionen entsprechen. Streng genommen beschränkt sich diese Beleuchtung mit der betreffenden homogenen Strahlenart nicht auf eine mathematische Linie, da auch der Spalt nicht eine mathematische Linie ist, die aus bloss übereinander liegenden leuchtenden Punkten besteht. Vielmehr wird ein senkrechtes Streifchen bei Σ_r von dieser homogenen Beleuchtung beschienen sein, doch kann man die Breite dieses Streifchens vernachlässigen, wenn die Breite des Spaltes sehr klein ist. Im Ganzen

wird also auf dem Schirme ein rechteckiges Stück beleuchtet sein und zwar wird jeder senkrechte Strich dieses Rechteckes fast nur von einer homogenen Strahlenart beschienen sein. Besteht der Schirm aus einem nicht fluorescirenden Stoffe dessen Oberfläche alle Lichtarten gleich gut diffus zurückstrahlt, so wird also ein diesen Schirm betrachtendes Auge von allen demselben senkrechten Striche des beleuchteten Rechteckes angehörigen Punkten gleichartige homogene Strahlenbündel zugesandt erhalten. Diesem Auge bietet sich dann das unter Name des prismatischen Sonnenspektrums bekannte Schauspiel dar.

Man kann sich diesen Anblick übrigens auch verschaffen, indem man die Netzhaut selbst als ersten bildauffangenden Schirm benutzt. Am einfachsten kann dies dadurch geschehen, dass das Auge unmittelbar hinter das Prisma gesetzt wird statt der Linse L, deren Funktion der brechende Apparat des Auges übernehmen kann, während die Netzhaut an die Stelle des Schirmes M tritt. Hierbei ist nothwendig, dass das Auge für die Entfernung des Spaltes S eingestellt ist. Auf diese Art erhält man natürlich ein sehr kleines Spektrum auf der Netzhaut, dessen kleine Einzelheiten nicht zu erkennen sind. Man kann aber auch das vielfache physische Bild des Spaltes in der Luft zu Stande kommen lassen und dasselbe aus der Richtung, wohin die Strahlen weiter gehen durch ein Okular betrachten. Dies ist die Anordnung der gebräuchlichen Fernrohrspektroskope. Hier kann man ein sehr vergrössertes Bild des Spektrums erhalten, das oft nicht auf einmal im Okularfeld des Fernrohrs zu übersehen ist. Aus technisch dioptrischen Gründen lässt man dabei meist nicht das Licht vom Spalt direkt auf das Prisma fallen, sondern lässt es zunächst durch eine vor das Prisma gestellte sogenannte Collimatorlinse gehen, welche vom Spalt ein unendlich entferntes virtuelles Bild entwirft, das als eigentliches Objekt anzusehen ist.

Der Anblick des Sonnenspektrums lehrt ohne Weiteres, dass die Reizung einer unermüdeten Netzhautstelle mit homogenen Lichtstrahlen im Allgemeinen einen sehr gesättigten Farbeneindruck macht, d. h. eine Empfindung, welche der bekannten Empfindung des weiss sehr unähnlich ist. Es lehrt ferner, dass dieser Farbeneindruck ein verschiedener ist, je nachdem die Oscillationszahl [1] der wirkenden

1 Eigentlich ist es logisch richtiger einen Lichtstrahl durch seine Schwingungszahl zu charakterisiren, da diese von dem Medium, in welchem er sich gerade fortpflanzt, unabhängig ist. Gleichwohl sollen im Folgenden, wo öfters numerische Bestimmungen vorkommen, die Strahlen auch durch ihre Wellenlängen in der Luft charakterisirt werden, weil deren Werth genauer bekannt ist, und in physikalischen Abhandlungen meist zur Charakteristik benutzt wird.

Strahlen eine verschiedene ist. Um sich bequem im Spektrum zu orientiren und angeben zu können, welche Werthe der Schwingungszahl die durch die Farbennamen bezeichneten Eindrücke hervorbringen, kann man sehr zweckmässig die FRAUNHOFER'schen Linien des Sonnenspektrums verwenden. Bekanntlich sind nämlich im Sonnenlicht gewisse Werthe der Schwingungszahlen nur durch sehr schwache Strahlen vertreten und da also, wo diese Strahlenarten im Spektrum zu suchen sind, zeigt sich ein dunkler Strich. Besonders 7 solcher Striche sind sehr auffällig und werden schon in einem mässig ausgebreiteten Spektrum leicht erkannt, es sind die allgemein mit den grossen lateinischen Buchstaben *B*, *C*, *D*, *E*, *F*, *G*, *H* bezeichneten FRAUNHOFER'schen Linien. Nachstehende Tabelle zeigt welche Schwingungszahlen und welche Wellenlängen (in Luft) diesen FRAUNHOFER'schen Linien entsprechen.

Bezeichnung der Linie.	Schwingungszahl.	Wellenlänge in Luft.
B	450 Billionen	0,0006878 mm.
C	472 „	0,0006564 „
D	526 „	0,0005888 „
E	589 „	0,0005260 „
F	640 „	0,0004843 „
G	722 „	0,0004291 „
H	790 „	0,0003928 „

Die Betrachtung des Spektrums ergiebt, dass dasselbe etwas jenseits der Linie *B* beginnt und von dieser Grenze an bis etwa zur Linie *C* hin roth aussieht. D. h. also Strahlen, deren Schwingungszahl weniger als 470 Billionen in der Sekunde beträgt, sofern sie überall die Netzhaut reizen, den Eindruck hervorbringen, den man mit „Roth“ bezeichnet und zwar ist die Beschaffenheit der Empfindung nicht sehr wesentlich verschieden, je nachdem die Schwingungszahl 440, 450 oder 460 Billionen beträgt. Erst wenn die Schwingungszahl über 470 Billionen wächst, ändert sich die Qualität der Empfindung sehr rasch, sie geht über in Orangegelb und schon bei 526 Billionen Schwingungen der Linie *D* entsprechend ist der Farbeneindruck ein ganz anderer, nämlich der des Gelb geworden. Der Theil des Spektrums um die Linie *E* sieht grün aus und von *D* bis *E* zeigen sich alle Uebergänge von Gelb zu Grün jedoch nur durch sehr schmale Zonen vertreten. Bei *F* beginnt das reine Blau, mit welchem Worte also der Eindruck bezeichnet wird, den Strahlen von etwa 640 Billionen Schwingungen in der Sekunde hervorbringen. Von *F* bis *G* finden sich die Farben, welche den Uebergang von

Blau zu Violett vermitteln, welchen letzteren Eindruck Strahlen hervorbringen, deren Schwingungszahl in der Sekunde 722 Billionen übersteigt. Eine Mittelstufe zwischen Blau und Violett pflegt man in der Kunstsprache der physikalischen und physiologischen Optik noch unter dem besonderen Namen des Indigoblau herauszuheben. Doch ist hierzu eigentlich keinerlei Bedürfniss vorhanden. Weit eher noch liesse es sich rechtfertigen, etwa zwischen Grün und Blau unter dem Namen Meergrün eine Mittelstufe besonders zu bezeichnen, da der Unterschied zwischen Blau und Grün ganz offenbar ein bedeutend grösserer ist, als der zwischen Blau und Violett. In der That ist auch die besondere Hervorhebung des Indigo aus der stetigen Reihe der Farbenempfindungen eine ganz unberechtigte historische Zufälligkeit. Newton hatte nämlich den Einfall, in der Farbenscala gerade 7 Punkte willkürlich festzustellen, weil in der Tonscala im Intervall einer Oktave durch die hergebrachte diatonische Durtonleiter 7 Punkte willkürlich fest gelegt waren. Im Sprachgebrauch fand er nur die 6 Bezeichnungen Roth, Orange, Gelb, Grün, Blau, Violett als brauchbar vor. Dass er nun gerade seinen 7ten Farbenton zwischen Blau und Violett und nicht zwischen Grün und Blau legte, hat wohl nur darin seinen Grund, dass im Sonnenspektrum die blaue und violette Zone viel ausgedehnter sind als die, welche die Uebergänge zwischen Grün und Blau enthält. Dies kann aber vom hier allein maassgebenden physiologischen Gesichtspunkte aus nur als ganz bedeutungslos bezeichnet werden, denn die Unterschiede der Farbenqualitäten sind keineswegs proportional den räumlichen Zwischenräumen, durch welche die entsprechenden Strahlungen im Sonnenspektrum getrennt sind.

Ueber die Grenzen der Fähigkeit des Auges den Farbenton zu unterscheiden, wenn es durch Strahlen von verschiedener Wellenlänge gereizt wird, liegt eine sehr sorgfältige Untersuchung von Mandelstamm[1] und Dobrowolsky vor, deren Ergebnisse in nachstehender Tabelle verzeichnet sind

B	$^1/_{115}$
C	$^1/_{167}$
C—D	$^1/_{331}$
D	$^1/_{772}$
D—E	$^1/_{246}$
E	$^1/_{340}$
E—F	$^1/_{615}$
F	$^1/_{740}$
G	$^1/_{272}$
H	$^1/_{146}$

1 Arch. f. Ophthalmologie XIII. (2) S. 399; XVIII. (1) S. 66.

Die grossen lateinischen Buchstaben der ersten Spalte bedeuten die FRAUNHOFER'schen Linien des Spektrums, in deren Gegend die Unterscheidungsfähigkeit gemessen ist. Die Zahlen der zweiten Spalte geben an, um wieviel sich die Wellenlänge einer Strahlung aus der betreffenden Gegend des Spektrums ändern muss, um einen merklich verschiedenen Farbeneindruck zu machen.

Zum Theil auf dieser verschiedenen Empfindlichkeit des Auges für Differenzen der Wellenlänge in verschiedenen Gegenden des Spektrums beruht die vorhin schon erwähnte Thatsache, dass sich der Farbenton im grünen und gelben Theil am raschesten ändert.

Es fällt bei Betrachtung des Sonnenspektrums ferner auf, dass abgesehen vom qualitativen Unterschiede, der Eindruck des Grünlichgelb bei weitem der stärkste ist, oder dass die Stelle zwischen den Linien *D* und *E* und zwar unmittelbar an *D* bei weitem am hellsten erscheint. Von da nimmt die Helligkeit gegen das rothe und violette Ende anfangs schnell, dann langsamer und zuletzt wieder schneller ab. Dies hat keineswegs seinen Grund in der objektiven Beschaffenheit des Sonnenspektrums, sondern wesentlich in der Beschaffenheit der Netzhaut. Keineswegs nämlich ist die Gegend zwischen *D* und *E* diejenige des Spektrums, wo die grösste Quantität von Energie auf die Flächeneinheit concentrirt ist. Um zu prüfen, wie die Energie der Strahlung sich im Spektrum vertheilt, muss man es auffangen mit einem möglichst vollkommen schwarzen Schirm, der möglichst wenig von der Energie der Strahlung sich vorwärts oder rückwärts fortpflanzen lässt, sondern dieselbe, wie man sich auszudrücken pflegt, „absorbirt". Hier wird also die ganze Energie verwendet werden müssen zur Erzeugung von molekularen Bewegungen der Theilchen des Schirmes selbst. Nach dem gegenwärtigen Stande unseres Wissens kann die Wirkung der Strahlung hier nur in einer Erwärmung des Schirmes bestehen, wenn er aus einer chemisch gegen Licht indifferenten Substanz gebildet ist. In der auf der Flächeneinheit des Schirmes entwickelten Wärmemenge hat man also ein Maass von der auf sie verwandten Energie der Strahlung. Nach diesem Maasse gemessen zeigt aber die den rothen Theil des Spektrums beleuchtende Strahlung eine viel grössere Energie als die, welche irgend einen anderen gleich grossen Theil desselben beleuchtet. Wir müssen daher annehmen, dass die Netzhaut ganz besonders stark reizbar ist durch die Strahlen von etwa 550 Billionen Schwingungen in der Sekunde. Jede andere Erklärung der in Rede stehenden Thatsache lässt sich, wie aus dem Folgenden hervorgehen wird, widerlegen oder wenigstens als unzureichend nachweisen. Ein ge-

naueres Bild von dem Verhalten der Netzhaut zu den verschiedenen Strahlenarten erhält man durch die Fig. 48. Die Abscissenlinie stellt die Grundlinie eines prismatischen Sonnenspektrums dar und sind

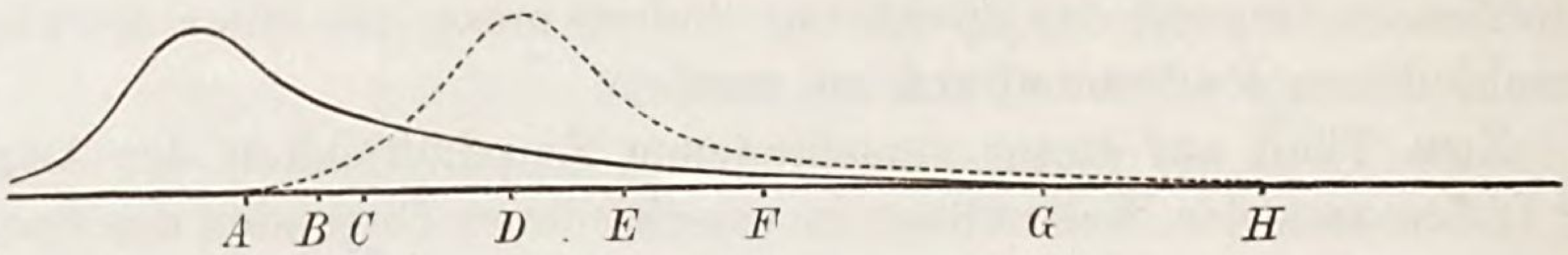


Fig. 48.

darin die Stellen der Fraunhofer'schen Linien durch die üblichen Buchstaben angedeutet. Die Ordinaten der stark ausgezogenen Curve messen die Dichtigkeit der Energie der Strahlung, welche die durch ihre Fusspunkte bezeichneten Stellen des Spektrums trifft, d. h. die Wärmemenge, welche bei vollständiger Absorption hier auf der Flächeneinheit in der Zeiteinheit entwickelt wird, oder noch richtiger ausgedrückt die Temperaturerhöhung, welche die hier auftreffende Strahlung in der Zeiteinheit bewirken kann.

Die Ordinaten der punktirten Curve geben für die einzelnen Stellen des Spektrums ungefähr die gesehenen Helligkeiten. Die Ordinate dieser Curve dividirt durch die entsprechende Ordinate der ausgezogenen Curve kann man also ansehen als ein Maass der gesammten physiologischen Reizwirkung, welche eine Arbeitseinheit von der durch den Fusspunkt der Ordinate charakterisirten Strahlenart im Netzhautapparate hervorbringt. Dieser Quotient ist zwischen der Linie *D* und *E* am grössten und nimmt von da nach dem rothen Ende sehr rasch, nach dem violetten Ende langsamer ab. Das heisst also mit anderen Worten, überall gleiche Energie vorausgesetzt machen Strahlen von etwa 550 Billionen Schwingungen in der Sekunde — welche den Eindruck „Grün" hervorbringen — den stärksten Reizeffekt, viel schwächer wirken Strahlen, wenn die Schwingungszahl unter 500 Billionen herabgeht, in welchem Falle der Eindruck den Charakter des „Roth" annimmt und gleichfalls schwächer aber nicht so viel schwächer ist der blaue und violette Eindruck, welcher durch die Energieeinheit von Strahlen grösserer Schwingungszahl entsteht.

Noch genauer als die punktirte Curve Fig. 48 giebt die nachstehende Tabelle Rechenschaft von dem physiologischen Effekte gleicher Flächenräume in verschiedenen Gegenden des Sonnenspektrums oder von der gesehenen Helligkeit der verschiedenen Spektralzonen. In der ersten Spalte ist die Zone des Spektrums durch Farbenton und Fraunhofer'sche Linie bezeichnet, in der zweiten und dritten Spalte

das Maass der gesehenen Helligkeit nach FRAUNHOFER und nach VIERORDT.

	FRAUNHOFER.	VIERORDT.
Roth *B*	32	22
Orange *C*	94	128
Röthlichgelb *D*	640	780
Gelb *D*—*E*	1000	1000
Grün *E*	480	370
Blaugrün *F*	170	128
Blau *G*	31	8
Violett *H*	5,6	0,7

Man sieht, dass diese beiden Zahlenreihen ziemlich gut übereinstimmen, obwohl sie nach ganz verschiedenen Methoden gefunden sind. FRAUNHOFER hat die Helligkeit einfach nach photometrischen Methoden geschätzt. VIERORDT[1] schätzte die Helligkeit einer Spektralzone nach der Menge weisses Lichtes, welche beigemischt werden musste, um ein eben merkliches Abblassen der Farbe zu bewirken.

Sowie hiernach die Reizbarkeit der Netzhaut für verschiedene Strahlenarten verschieden ist, so ist auch je nach der Natur der Strahlung die Fähigkeit des Gesichtssinnes eine verschiedene, kleine Unterschiede der Intensität zu bemerken. Nach den Untersuchungen von LAMANSKY[2] genügt für die Strahlen des Spektrums, welche den Eindruck von Gelb und Grün machen, schon eine Aenderung der Intensität um $^1/_{286}$ ihres Werthes um einen merklichen Unterschied der Empfindungsstärke hervorzubringen für Blau $^1/_{212}$, für Violett muss die Aenderung $^1/_{106}$ betragen, für Orange $^1/_{78}$ und für Roth $^1/_{70}$. DOBROWOLSKY fand nach einer andern Methode die Unterscheidungsfähigkeit überall kleiner, er fand dieselbe am grössten für den indigofarbigen Theil des Spektrums.

Es mögen gleich hier vorgreifend Angaben Platz finden über die Feinheit der Unterscheidung von Intensitäten solcher Strahlungen, die den Eindruck des Weiss machen. Solche Angaben liegen zum Theil schon aus älterer Zeit vor, die umfangreichsten Untersuchungen sind in neuerer Zeit von AUBERT[3] angestellt. Ich entnehme denselben nachstehende Versuchsreihe mit Kerzenlicht

1 VIERORDT, Die Anwendung des Spektralapparates u. s. w. Tübingen 1871.
2 LAMANSKY, Arch. f. Ophthalmologie XVII. (1) S. 123.
3 Siehe dessen Physiologie der Netzhaut.

Absolute Helligkeit	Unterschiedsempfindlichkeit
710	$^1/_{164}$
173	$^1/_{140}$
100	$^1/_{123}$
44	$^1/_{106}$
25	$^1/_{104}$
16	$^1/_{94}$
7	$^1/_{90}$
4	$^1/_{67}$
1	$^1/_{35}$

Der Bruch in der zweiten Spalte giebt an, um den wievielten Theil der kleineren Intensität sich zwei Strahlungen unterscheiden müssen, wenn sie als verschieden hell erkannt werden sollen. Man sieht, dass dieser Bruchtheil um so kleiner sein darf je intensiver die Strahlungen sind. Im Bereich der grösseren Intensitätswerthe der vorstehenden Tabelle nimmt aber der zur Unterscheidung erforderliche Bruchtheil der gesammten Intensität nur sehr wenig mit wachsendem Werthe dieser letzteren ab. Es widersprechen daher diese Versuche nicht den Ergebnissen älterer von Weber, Fechner und anderen angestellten Versuchen, wonach für ein beträchtliches Intervall der Reizskala zwei Lichtreize sich immer um denselben Bruchtheil unterscheiden müssen um Empfindungen hervorzurufen, deren Unterschied eben merklich sein soll.

Hält man die Versuche über weiss aussehendes Licht zusammen mit den soeben erwähnten Versuchen von Lamansky über farbiges, so ergiebt sich, dass die Fähigkeit des Auges, Intensitätsunterschiede zu erkennen, bei weissem Lichte nicht so weit geht als bei blauem und grünem, aber weiter als bei orangefarbenem, rothem und violettem.

III. Die unsichtbaren Strahlen.

Der Anblick der Fig. 48 lehrt uns noch eine höchst merkwürdige Thatsache, dass nämlich ein Stück über die Linie A hinaus, wo vom Auge keine Spur von Beleuchtung wahrgenommen wird, der das Spektrum aufnehmende Schirm von Strahlen getroffen wird, deren Schwingungszahl kleiner ist, 400 Billionen in der Sekunde. Die Energie dieser wenigst brechbaren Strahlen des Sonnenlichtes ist sogar grösser als die Energie der Strahlen von irgend welcher höheren Brechbarkeitsstufe. Dass diese Strahlen auf die Netzhaut nicht reizend wirken, könnte möglicherweise darauf beruhen, dass dieselben die brechenden Medien des Auges nicht zu durchdringen vermögen und also gar nicht zur Netzhaut gelangen. Diese Erklärung ist aber nicht zulässig. Es ist allerdings durch besondere Ver-

suche bewiesen, dass Strahlen jener geringen Brechbarkeit beim Durchgang durch die brechenden Medien des Auges eine bedeutende Schwächung erleiden. Wenn wir uns also die Energiekurve eines auf der Netzhaut entworfenen Sonnenspektrums korrekt vorstellen wollten, so würden wir die Ordinaten des links von der Linie *A* gelegenen Theiles bedeutend kleiner zu denken haben als sie in Fig. 48 erscheinen. Auch die Strahlen, welche etwas rechts von *A* im Spektrum eintreffen, werden in wässrigen Flüssigkeiten, die ja in sehr dicken Schichten grünblau aussehen, etwas stärker absorbirt. Es wären also auch die Ordinaten zunächst rechts an *A* wohl noch etwas zu verkleinern. Die Versuche geben uns aber, wie mir scheint, kein Recht anzunehmen, dass jene Strahlen die Augenmedien absolut gar nicht zu durchdringen vermögen, was auch gegen jede Analogie wäre. Man erhält aber selbst dann keine Lichtempfindung, wenn man Strahlen von kleinerer Schwingungszahl als 400 Billionen in der Sekunde, mit ganz ausserordentlicher Intensität ins Auge fallen lässt. Zum Beweise hierfür kann ein schöner von TYNDALL zuerst ausgeführter Versuch dienen. Lässt man das von den glühenden Kohlenspitzen der elektrischen Lampe ausgesandte und durch einen Hohlspiegel konvergent gemachte Strahlenbündel durch eine Schicht von Schwefelkohlenstoff, in welchem Jod gelöst ist, hindurchgehen, so werden darin alle Strahlen von grösserer Schwingungszahl als 450 Billionen in der Sekunde absorbirt und es gehen nur die Strahlen von geringerer Schwingungszahl durch. Diese Strahlung hat aber noch solche Energie, dass in ihrem Vereinigungspunkt eine Hitze entsteht, welche ein mit Platinrohr überzogenes Platinblech sofort glühend macht. Bringt man nun das Auge in den von diesem Punkte ausgesandten Strahlenkegel, so entsteht trotz der bedeutenden Schwächung, welche diese Strahlen in den brechenden Medien des Auges erleiden, auf der Netzhaut ein gewiss noch sehr intensiv bestrahlter Fleck, da in diesem Versuche eben die ursprüngliche Intensität der Strahlung so überaus stark ist. Gleichwohl hat man nicht die mindeste Lichtempfindung. Am intensivsten ist offenbar die Bestrahlung der Netzhautstelle, wenn das Auge so gestellt wird, dass der Fokus um die Sehweite vom Auge entfernt ist, so dass ein deutliches Bild desselben auf der Netzhaut entsteht. Es beruht auf einem Irrthum, wenn TYNDALL um den Versuch recht beweisend zu machen seine Retina an den Ort des Fokus selbst setzte. Er brachte dabei seine Hornhaut in die Gefahr einer schädlichen Erwärmung, ohne die Beweiskraft im mindesten zu erhöhen, denn das jetzt konvergent auf die Hornhaut fallende Strahlenbündel

wurde durch die Brechung an den Trennungsflächen des Auges schon in der vorderen Augenkammer zur Vereinigung gebracht und auf der Netzhaut über ein so grosses Flächenstück ausgebreitet, dass hier die Intensität sicher nicht grösser sein wird, als wenn man den vom Fokus ausgehenden Strahlenkegel aus der Akkommodationsferne in das Auge fallen lässt. So oder so angestellt, beweist dieser Versuch über allen Zweifel, dass Strahlen von weniger als 400 Billionen Schwingungen in der Sekunde, wenn sie in noch so grosser Intensität die Netzhaut treffen, ihre Elemente nicht zu reizen vermögen.

Die Physik lehrt ferner, dass in der Sonnenstrahlung wie sie an der Erdoberfläche ankommt und mehr noch in der Strahlung des elektrischen Lichtes auch Strahlen vorhanden sind, deren Schwingungszahl in der Sekunde weit grösser ist als 790 Billionen — die sogenannten ultravioletten Strahlen. Die Energie dieser Strahlen, welche auf die Flächeneinheit des Spektrums jenseits der Linie H trifft, gemessen durch die entwickelte Wärme, ist freilich sehr gering, aber doch ist sie gross genug um gewisse andere sehr merkliche Wirkungen auszuüben. Z. B. wird ein mit Chlorsilber behandeltes Papierblatt im Sonnenspektrum weit über die Linie H hinaus sehr entschieden geschwärzt, wo es für das Auge vollkommen dunkel erscheint. Besonders augenfällig kann man das Vorhandensein der ultravioletten Strahlen im Sonnenschein machen, wenn man das Spektrum auf der Oberfläche einer fluorescirenden Substanz auffängt. So nennt man bekanntlich Stoffe, welche von ultravioletten Strahlen getroffen nun ihrerseits Strahlen von geringerer Schwingungszahl aussenden und diese wirken dann verhältnissmässig stark auf das Auge. Fängt man z. B. das Sonnenspektrum oder noch besser das Spektrum des elektrischen Lichtes mit einem Schirme auf, der aus einem mit Aesculinlösung getränkten Papier angefertigt ist, so sieht man noch weit über die Linie H hinaus sich einen bläulichen Schimmer erstrecken. Besonders weit erstreckt sich derselbe, wenn man zur Erzeugung des Spektrums nicht Linsen und Prismen aus Glas sondern aus Bergkrystall verwendet, weil dieser die ultravioletten Strahlen weit besser durchlässt als Glas. Es ist für die ultravioletten Strahlen dieselbe Frage aufzuwerfen wie für die ultrarothen, ob nämlich die Unsichtbarkeit des von ihnen beschienenen Theiles des Spektrums dadurch zu erklären ist, dass diese Strahlen die Augenmedien nicht durchdringen und folglich gar nicht zur Netzhaut gelangen oder dadurch, dass auch für sie die Netzhaut nicht erregbar ist. Es ist nun durch Versuche nachgewiesen, dass die ultravioletten Strahlen die Augenmedien wohl durchsetzen können, wenn auch besonders in

der Linsen- und Hornhautsubstanz eine recht merkliche Absorption derselben stattfindet. Die Unsichtbarkeit des ultravioletten Theiles des Sonnenspektrums muss also ebenso wie die des ultrarothen Theiles auf die mangelnde Erregbarkeit der Netzhaut für diese Strahlen bezogen werden. Uebrigens ist für sie die Netzhaut nicht wie für die ultrarothen absolut unerregbar, sondern nur sehr wenig erregbar. In der That kann der ultraviolette Theil des Spektrums ganz direkt gesehen werden, wenn man für Abblendung des im gewöhnlichen Sinne sichtbaren Theiles sowie überhaupt alles anderen Lichtes sorgt. Wie ausserordentlich gering aber die Intensität der Erregung durch ultraviolette Strahlen ist, gewahrt man, wenn man solche ganz ausschliesslich theilweise auf einen fluorescirenden, theilweise auf einen nicht fluorescirenden Schirm wirft. Die Helligkeit des fluorescirenden Schirmes erscheint alsdann nach Helmholtz's Schätzung 1200 mal so gross als die der nicht fluorescirenden. Da man nun keinen Grund zu der Annahme hat, dass in fluorescirenden Körpern durch ultraviolette Strahlen Kräfte ausgelöst werden, sie vielmehr sicher nur die Schwingungszahl jener Strahlen ändern ohne der Energie etwas zuzufügen, so muss man schliessen, dass dieselbe Energie in Form von ultravioletten Strahlen in einem gegebenen Flächenstück der Netzhaut eine 1200 mal schwächere Erregung hervorbringt als in Form von weniger brechbaren Strahlen. Man kann demnach wohl sagen, dass für den praktischen Gebrauch des Auges die Reizbarkeit der Netzhaut durch ultraviolette Strahlen nicht in Betracht kommt.

Zu der durch ultraviolette Strahlen erzeugten Lichtempfindung tragen in geringem Maasse wahrscheinlich Strahlen von niederer Brechbarkeit bei, welche durch eigene Fluorescenz erst in den Retinaelementen selbst unter dem Einflusse ultravioletter Strahlen entstehen. Man sieht nämlich die Netzhaut eines Leichenauges in ultravioletter Beleuchtung etwas fluoresciren und zwar in grünlich-weisser Farbe, da nun direkte Einwirkung der ultravioletten Strahlen einen mehr bläulich-weissen Eindruck macht, so kann man aus den später zu entwickelnden Lehren von der Farbenmischung schliessen, dass die Reizung durch diese Strahlen selbst einen mehr violetten Eindruck macht, der durch das grünliche Fluorescenzlicht zu bläulich-weiss modificirt wird. Kürzlich haben W. v. Bezold und Engelhardt[1] die Fluorescenz der Netzhaut auch am lebenden Auge nachgewiesen. Sie sahen nämlich, wenn ein Netzhautstück durch homogenes violettes oder ultraviolettes Licht beleuchtet war, ophthalmoskopisch die

1 Engelhardt, Sitzgungsber. d. bayr. Acad. 1877. 7. Juli.

Gefässe desselben in natürlicher Blutfarbe, was nur durch Fluorescenz der dahinter liegenden Netzhautelemente erklärt werden kann.

Die Unfähigkeit der Netzhaut durch ultraviolette und ultrarothe Strahlen erregt zu werden, ist für den Sehakt von der allergrössten Wichtigkeit. Wäre die Netzhaut durch die ultrarothen Strahlen auch nur im mindesten reizbar, so würde offenbar ein Sehen äusserer Objekte gar nicht stattfinden können. Solche Strahlen nämlich werden bekanntlich auch von Körpern niederer Temperatur selbständig ausgesandt. Es ist wohl kaum zu bezweifeln, dass die Energie der ultrarothen Strahlung, welche ein Netzhautstäbchen allein schon von den vor ihm gelegenen, doch immerhin 37° warmen anderen Netzhautelementen erhält, so gering sie auch sein mag grösser ist als die Energie der sämmtlichen Strahlen hoher Brechbarkeit, welche dies Stäbchen von einem schwach beleuchteten Objekte erhält. Wäre nun das Stäbchen durch jene Strahlen reizbar, so käme es gar nie zur Ruhe und in dem beständig hellen Gesichtsfelde könnten sich schwach beleuchtete Bilder äusserer Objekte gar nicht auszeichnen.

Eine Reizbarkeit durch ultraviolette Strahlen würde allerdings nicht so principiell unverträglich mit dem Sehen sein, da von den Theilen des Auges selbst keine solchen ausgesandt werden, jedesfalls würde aber eine starke Reizung durch jene Strahlen die Deutlichkeit des Sehens bedeutend beeinträchtigen. Im Bereiche der ultravioletten Strahlung nimmt nämlich der Brechungsindex sehr rasch mit der Schwingungszahl zu. Kämen sie also beim Sehakt stark zur Geltung, so würde die Deutlichkeit der Bilder durch die chromatische Abweichung des brechenden Apparates sicher merklich gestört werden.[1] In dieser Beziehung ist es offenbar von Bedeutung, dass schon die violetten Strahlen meist wenig wirken.

VI. Symbolische Darstellung der Farbentöne.

Die Unterschiede der Empfindungsqualitäten, welche durch die verschiedenen homogenen Strahlungen des Spektrums veranlasst werden, sind allgemein anerkannt als mathematische Grössen, denn es

1 Obwohl ich schon vor 4 Jahren (Fick, Compendium der Physiologie. 2. Aufl. S. 181—182) auf die Zweckmässigkeit der Unerregbarkeit der Netzhaut durch ultrarothe und ultraviolette Strahlen aufmerksam gemacht habe, scheint dieselbe doch immer noch von manchen für eine Unvollkommenheit des Auges angesehen zu werden. So sagt Tyndall (in seinen Vorlesungen über das Licht. (Deutsche Ausgabe 1876. S. 177) mit Bezug darauf: Wollten wir uns erlauben, für einen Augenblick den Begriff des allmählichen Wachsens, Verbesserns und Aufsteigens anzueignen, der im Worte Evolution liegt, so könnten wir ruhig schliessen, dass noch grosse Vorräthe von sichtbaren Eindrücken den Menschen erwarten, weit grössere als diejenigen die er jetzt besitzt.

nimmt Niemand Anstoss an quantitativen Schätzungen dieser Unterschiede. Ja die von den meisten Menschen gemachten Schätzungen der Art stimmen sehr wohl überein. Z. B. wird gewiss kein Widerspruch erhoben werden gegen den Satz, dass die Empfindung Roth der Empfindung Orange mehr ähnlich sei als der Empfindung Grün. Es ist ferner eine Thatsache der unmittelbaren Anschauung, dass diese Farbenempfindungsunterschiede stetig veränderliche Grössen sind, so dass der eine „Farbenton" — mit diesem Ausdruck soll der bestimmte Charakter einer durch homogene Strahlung verursachten Lichtempfindung bezeichnet werden — durch unendlich kleine Abstufungen in einen andern Farbenton übergehen kann. Es entspricht ferner einem unendlich kleinen Unterschiede zweier Farbenempfindungen ein unendlich kleiner Unterschied der Schwingungszahlen der beiden homogenen Strahlungen, durch welche die beiden Farbenempfindungen hervorgerufen werden. Gleich grossen endlichen Unterschieden der Schwingungszahl homogener Strahlen entsprechen aber keineswegs gleich grosse Unterschiede im Farbenton. So ist namentlich nach dem übereinstimmenden Zeugniss aller normal sehenden Menschen der Farbenton Violett dem Roth entschieden ähnlicher als der Farbenton Blau, obwohl die Schwingungszahl, die dem Violett entspricht, 790 Billionen weiter von der die Empfindung Roth veranlassenden nämlich 450 Billionen differirt als die dem Blau entsprechende nämlich etwa 700 Billionen.

Man kann hiernach das stetige Fortschreiten von einem Farbenton zum andern füglich symbolisch darstellen durch das Fortschreiten von einem Punkte zum andern längs eines Linienzuges. Zum Maasse des Unterschiedes zweier Farbentöne muss bei dieser Darstellung eine Grösse gemacht werden, welche von der gegenseitigen Lage der die Farbentöne bezeichnenden Punkte dergestalt abhängt, dass sie unendlich klein wird, wenn die beiden Punkte einander unendlich nahe liegen. Eine solche Darstellung wird den bereits ausgesprochenen Thatsachen der inneren Anschauung gerecht, wenn man dem Linienzug eine Gestalt giebt, wie die der stark ausgezogenen Curve Fig. 49, an welcher die Namen der Farben angeschrieben sind, und wenn man festsetzt zum Maasse des Unterschiedes zweier Farbentöne soll der hohle Winkel dienen, den die zwei Fahrstrahlen miteinander machen, welche man von einem auf der concaven Seite der Curve gelegenen Pol (*W* Fig. 49) zu den zwei die Farbentöne darstellenden Punkten ziehen kann. Nur so kann die Darstellung vergegenwärtigen, dass der Unterschied von Roth und Violett kleiner ist als z. B. der von Roth und Grün, sofern eben dieser Unterschied

durch den grösseren Winkel RWG, jener durch den kleineren Winkel RWH[1] gemessen wird.

Im Uebrigen hätte der Verlauf der Curve und die Lage des

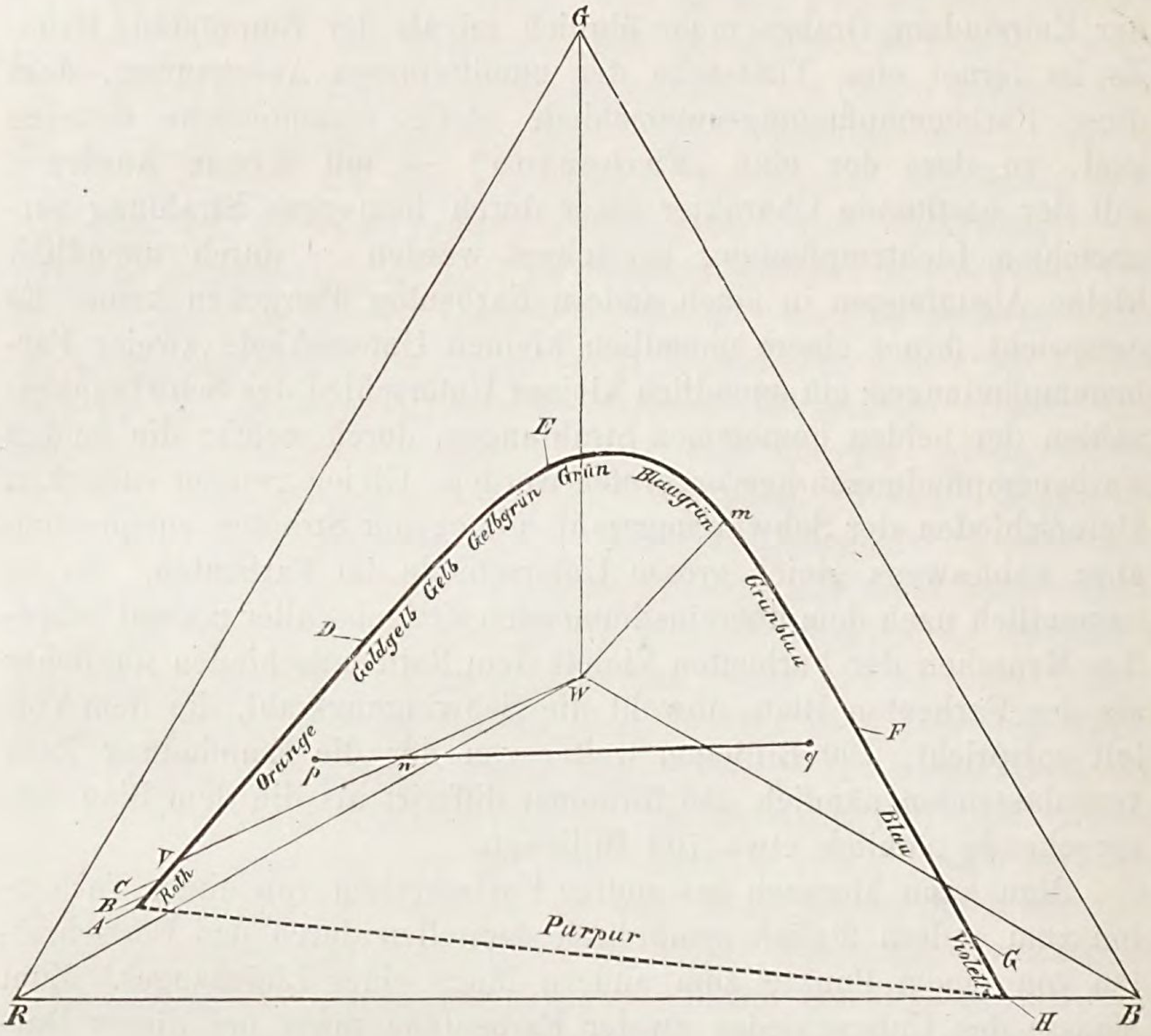


Fig. 49.

Poles W innerhalb weiter Grenzen verschieden gewählt werden können, wenn blos die bisher ausgesprochenen Beziehungen der homogenen Farbentöne dargestellt werden sollten. Die besondere Wahl der Form und der Lage des Poles in der Figur ist schon mit Rücksicht auf die folgenden Sätze getroffen.

1 Die Seite WH dieses Winkels ist in der Figur nicht ausgezogen.

VIERTES CAPITEL.

Die gemischten Farben.

I. Zusammenwirken von zwei homogenen Strahlungen.

Es soll jetzt weiter untersucht werden, welchen Charakter die Lichtempfindungen haben wenn mehrere homogene Strahlungen zugleich dieselben Netzhautelemente reizen. Um mit dem einfachsten Falle zu beginnen, wollen wir zunächst nur immer je zwei homogene Strahlenarten auf dieselbe Netzhautstelle wirken lassen. Zu diesem Zwecke kann man sich folgender Methode bedienen. Auf einem Schirm S, Fig. 50 erzeugt das Prisma P nebst der Linse L, in der

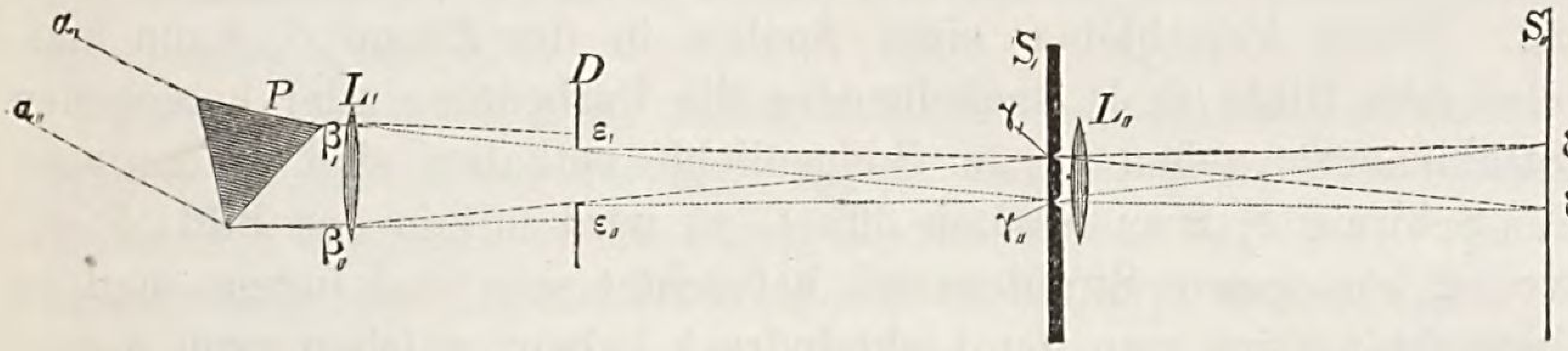


Fig. 50.

Weise wie in Fig. 47 auf S. 170 ein reines Spektrum indem wie dort Sonnenstrahlen durch einen feinen senkrechten Spalt (der in der Figur 50 nicht gezeichnet ist) aus den Richtungen α, und $\alpha_{,,}$ auf die vordere Prismenfläche fallen. Zwischen die Linse L, und den Schirm S, stellt man nahe an L, noch einen Schirm D mit einer rechteckigen Oeffnung ε, $\varepsilon_{,,}$, welche bloss den noch unzerstreuten Theil des von L, ausgehenden Strahlensystemes durchlässt. Diese Oeffnung bildet also gleichsam ein weisses Objekt, denn ein auf sie gelegtes Blatt Papier würde einen stark beleuchteten weissen Fleck zeigen, und wenn man dicht hinter S, eine zweite achromatische Linse stellt, so wird dieselbe, wenn S, weggenommen wird in der zu $DL_{,,}$ konjugirten Vereinigungsweite $L_{,,}S_{,,}$ ein ebenfalls weisses Bild entwerfen, das auf einem bei $S_{,,}$ aufgestellten Blatt Papier dargestellt werden kann. Das aus der Oeffnung ε, $\varepsilon_{,,}$ nach rechts hervorgehende Strahlensystem hat aber eine ganz besondere Beschaffenheit. Nämlich von jedem Punkte dieser Oeffnung geht ein Strahlenbündel aus das aus lauter homogenen Strahlen besteht die sich zu verschiedenen Punkten des Schirmes S, begeben. Der Strahl von grösster Brech-

barkeit geht zum Punkte $\gamma_,$ der von geringster geht zum Punkte $\gamma_{,,}$ und die übrigen von mittlerer Brechbarkeit zu zwischenliegenden Punkten. Als Beispiel sind die beiden Strahlen von stärkster Brechbarkeit, welche durch die beiden Endpunkte $\varepsilon_,$ und $\varepsilon_{,,}$ gegangen sind durch gestrichelte Linien angedeutet und ebenso durch punktirte Linien die beiden Strahlen von kleinster Brechbarkeit, welche von eben diesen Endpunkten $\varepsilon_,$ und $\varepsilon_{,,}$ ausgehen. Wird also vor die Linse $L_{,,}$ der vorhin erwähnte Schirm $S_,$ aufgestellt und befindet sich in demselben etwa bei $\gamma_,$ ein schmaler Spalt, so kann nunmehr das Bild $\delta_, \delta_{,,}$ der rechteckigen Oeffnung $\varepsilon_, \varepsilon_{,,}$ nur von Strahlen höchster Brechbarkeit erleuchtet werden und erscheint in seiner ganzen Ausdehnung gleichmässig im gesättigten Farbenton, der dieser Strahlenart entspricht. Wird dagegen nur ein Spalt bei $\gamma_{,,}$ eröffnet, so erscheint das Bild $S_, S_{,,}$ im Farbenton der wenigst brechbaren Strahlen. Und im Farbenton einer bestimmten Strahlenart mittlerer Brechbarkeit erscheint das Bild wenn ein Spalt zwischen $\gamma_,$ und $\gamma_{,,}$ im Schirm offen ist. Durch Verschieben eines Spaltes in der Ebene $S_,$ kann man also dem Bilde $\delta_, \delta_{,,}$ nacheinander die Farbentöne aller homogener Strahlenarten geben die im Sonnenlichte enthalten sind. Wenn man im Schirme $S_,$ zwei Spalten öffnet, so wird mithin das Bild $\delta_, \delta_{,,}$ von 2 homogenen Strahlenarten beleuchtet sein und indem man es betrachtet, wird man den Lichteindruck haben, welchen zwei homogene Strahlenarten zusammen hervorbringen, wenn sie gleichzeitig eine Netzhautstelle treffen. Man kann auf diese Art jede homogene Strahlenart mit jeder andern kombiniren, denn man kann durch verschiedene Stellung der Spalten auf $S_,$ zwei beliebige Stellen des Spektrum kombiniren, wie verlangt wurde. Durch Oeffnen von 3 Spalten in $S_,$ können natürlich auch 3 homogene Strahlenarten auf $\delta_, \delta_{,,}$ kombinirt werden. Die nach dieser Methode angestellten Versuche über homogene Farben und Mischfarben gehören zu den schönsten optischen Demonstrationen die man sehen kann.

Die beschriebene Methode erfordert selbstverständlich zu ihrer Ausführung direktes Sonnenlicht, man kann aber genau dieselben Erscheinungen auch im diffusen Tageslicht subjektiv beobachten. Die Methode beruht auf demselben Princip und ist folgende. $S_,$ sei ein in Fig. 51 von diffusem Tageslicht beleuchteter Spalt, P ein Prisma und L eine achromatische Linse. Die Anordnung sei so, dass auf einem Schirme M ein reines Spektrum entsteht. Befindet sich nun in diesem Schirme ein Spalt σ der Stelle entsprechend wo z. B. die Strahlen von 600 Bill. Schwingungen eintreffen, so wird ein hinter diesem Spalt befindliches Auge dessen Sehweite gleich seiner Entfer-

nung vom Prisma ist die Prismenfläche deutlich sehen und zwar ganz gleichmässig in der Farbe, welche der gewählten Schwingungszahl entspricht. Befindet sich bei S_2 ein zweiter Spalt mit Tages-

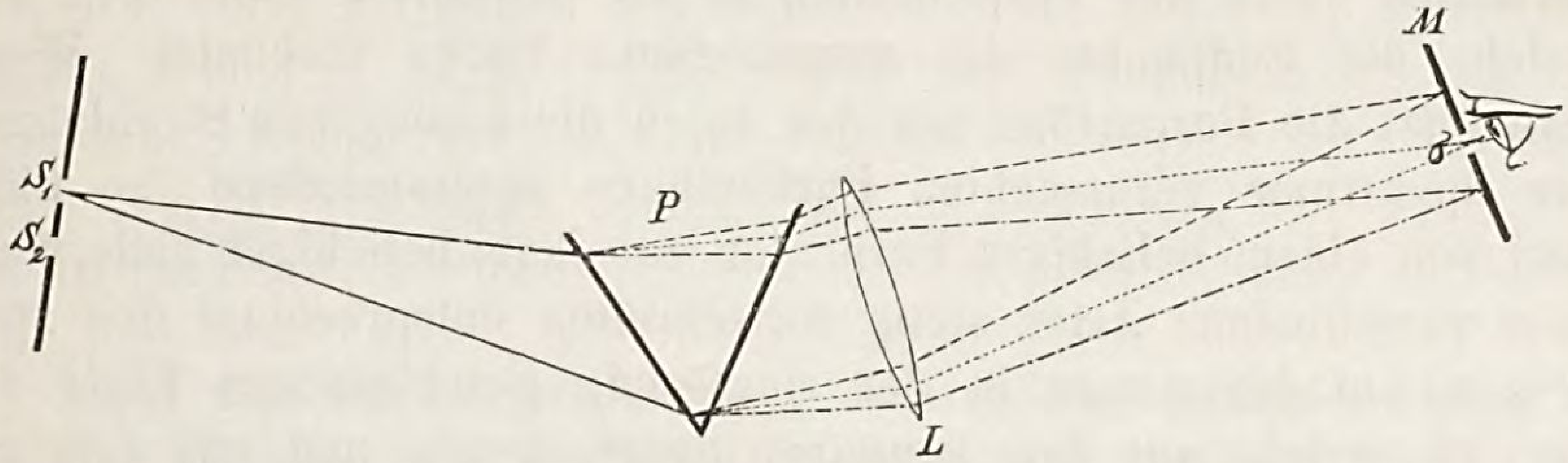


Fig. 51.

licht beleuchtet, so wird ein zweites Spektrum auf M gebildet von diesem aber treffen andere Strahlen von geringerer Brechbarkeit auf den Spalt σ und das Auge hinter σ wird jetzt von jedem Punkte der Prismenfläche zweierlei Strahlen erhalten also dieselbe in der Mischfarbe sehen.

Prüft man nach einer dieser Methoden alle möglichen Paare homogener Strahlenarten durch, so erhält man für jedes Paar entsprechend den unendlich vielen Werthen, welche das Verhältniss der Intensitäten beider Strahlenarten annehmen kann, unendlich viele verschiedene Lichtempfindungen von verschiedener Qualität die durch ihre unmerklichen Abstufungen von der Farbe der einen Strahlenart zur Farbe der andern einen stetigen Uebergang bilden. Die gesammten so erhaltenen neuen Eindrücke sind zwar alle verschieden von den durch homogene Strahlungen erzeugten, aber sie sind nicht mehr alle unter einander verschieden, so dass schon bei der blossen Zusammensetzung zweier homogener Strahlen in allen möglichen Verhältnissen der Intensität die Mannigfaltigkeit der Empfindungsqualitäten hinter der Mannigfaltigkeit der als Reize dienenden physikalischen Vorgänge weit zurückbleibt. Heben wir zunächst einzelne Beispiele hervor. Lässt man Strahlen von 450 Billionen Schwingungen (die den Eindruck roth machen) mit solchen von 790 Billionen Schwingungen zusammen wirken, so erhält man durch Variiren des Verhältnisses der Intensitäten der beiden Strahlenarten eine neue Reihe von Lichteindrücken, deren Farbenton mit keinem der spektralen Farbentöne genau übereinstimmt. Diese ganz neuen Farbentöne die wir als Purpurtöne bezeichnen wollen, sind dem Roth und dem Violett mehr oder weniger ähnlich je nachdem die Strahlen von 450 Billionen oder die von 790 Billionen Schwingungen mehr oder weniger stark in der Mischung vertreten sind. Durch stetiges Aendern dieses

Intensitätsverhältnisses von ∞ zu Null erhält man einen stetigen Uebergang von Roth zu Violett durch die verschiedenen Purpurtöne. Man kann demnach dieses Fortschreiten von Roth zu Violett symbolisch darstellen durch das Fortschreiten in der punktirten Linie (Fig. 49), welche die Endpunkte der ausgezogenen Curve verbindet. Wenn man jetzt die Purpurtöne mit den durch die homogenen Strahlungen des Spektrums verursachten Farbentönen zusammenfasst, so kann man von einem beliebigen Farbenton zu einem beliebigen andern auf zwei verschiedene Arten stetig fortschreiten entsprechend den zwei Wegen, auf denen man in der ringförmig geschlossenen Linie der Fig. 49, welche aus dem krummen ausgezogenen und aus dem geraden punktirten Stücke besteht, von jedem Punkte zu jedem andern gelangen kann. So kann man z. B. vom Farbenton Gelb zum Farbenton Blau fortschreiten entweder durch Grünlichgelb, Grün, Blaugrün oder durch Orange, Roth, Purpur Violett.

Eine ganz besondere Erscheinung tritt hervor wenn man gewisse homogene Strahlenpaare des Spektrums zusammenwirken lässt, welche man komplementäre nennt. Bringt man z. B. mit Strahlen von der Wellenlänge 0,0006559 (die für sich den Eindruck Roth machen) in einem gewissen Intensitätsverhältnisse Strahlen von der Wellenlänge 0,0004875 (die den Eindruck Blaugrün machen) auf der Netzhaut zusammen, so entsteht ein Lichteindruck, welcher im Farbenton weder an Roth noch an Blaugrün noch an irgend einen andern (Purpur eingeschlossen) im mindesten erinnert. Es ist der im gemeinen Sprachgebrauch mit „Weiss" bezeichnete Lichteindruck.

Ausser dem soeben bezeichneten giebt es nun noch unzählige andere komplementäre Strahlenpaare, die in bestimmtem Intensitätsverhältnisse zusammenwirkend den Eindruck des Weiss hervorbringen. Nach J. J. Müller's Bestimmungen die für sein linkes und rechtes Auge ein wenig von einander abweichen (denen auch das vorige Beispiel entnommen war) sind folgende Farbentöne komplementär.

Farbe.	Wellenlänge.	Komplementäre Farbe.	Wellenlänge linkes Auge.	Wellenlänge rechtes Auge.
Roth	0,0006559	Blaugrün	0,0004875	0,0004865
Violett	0,0004225	Gelb	0,0005591	0,0005608

Etwas abweichend sind Bestimmungen von Helmholtz die in Hundertmilliontheilen[1] des Pariser Zolles die Wellenlängen geben.

1 In Helmholtz's physiologischer Optik steht wahrscheinlich durch einen

Farbe.	Wellenlänge.	Komplementäre Farbe.	Wellenlänge.	Verhältniss der Wellenlänge.
Roth	2425	Grünblau	1818	1,334
Orange	2244	Blau	1809	1,240
Goldgelb	2162	Blau	1793	1,206
Goldgelb	2120	Blau	1781	1,190
Gelb	2095	Indigblau	1716	1,221
Gelb	2085	Indigblau	1706	1,222
Grüngelb	2082	Violett	von 1600 ab	1,301

Lässt man ein komplementäres Strahlenpaar zusammenwirken in anderem Intensitätsverhältniss als in welchem sie weiss geben, so erhält man einen Lichteindruck, welcher an den Farbenton der vorherrschenden Strahlenart erinnert aber mit dem Weiss Aehnlichkeit hat und zwar um so mehr je mehr sich das Intensitätsverhältniss der Strahlen dem nähert, in welchem zusammenwirkend sie weiss geben. Solche Farbeneindrücke nennt man blasse, weissliche oder auch wohl im gemeinen Leben sehr uneigentlich „helle“ Farben. Die Abweichung eines Farbeneindruckes — sei er nun durch homogene Strahlung oder durch Zusammenwirken mehrerer homogener Strahlen hervorgebracht — vom Weiss kann füglich im Anschluss an den gemeinen Sprachgebrauch als Grad der Sättigung der Farbe bezeichnet werden. Dieser Grad ist eine mathematische Grösse.

Höchst bemerkenswerth ist die Thatsache, dass zu den homogenen Strahlen, welche den Eindruck des Grün machen (also etwa den Wellenlängen zwischen 0,0005636 und 0,0004921 mm. entsprechend) keine komplementäre homogene Strahlenart im Spektrum zu finden ist.

Wir untersuchen endlich die Beschaffenheit der Lichteindrücke, welche durch Zusammenwirken zweier homogener Strahlungen entstehen, die nicht komplementär sind und schliessen auch das schon behandelte Paar von homogenen Strahlenarten an den beiden äussersten Enden des Spektrums aus. Die Hauptsätze hierüber sind nach Untersuchungen von J. J. Müller in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt. Zu ihrem Verständniss sind einige Bemerkungen nöthig. Die homogene Strahlenart ist immer nur durch den Namen des von ihr hervorgebrachten Farbeneindruckes bezeichnet, weil es hier nicht auf sehr genaue Bestimmung der Wellenlänge ankommt. Wo in der Rubrik Mischfarbe mehrere Farbennamen durch „oder“ ver-

Druckfehler in „Milliontheilen“. Ich habe in der Tabelle die Originalzahlen von Helmholtz gegeben, sie können durch Multiplikation mit 27,07 auf Millimetermaass reducirt werden.

bunden stehen, kommt der eine oder der andere Farbeneindruck zu Stande je nachdem die erste oder zweite homogene Componente an Intensität vorherrscht. Das Wort spektral in der Rubrik Sättigungsgrad soll bedeuten, dass der Eindruck der gemischten Strahlung merklich ebenso gesättigt ist wie der Eindruck den eine homogene Strahlung von dem entsprechenden Farbenton hervorruft.

Componenten.	Ton der Mischfarbe.	Sättigungsgrad.
Roth — Gelb.	Orange.	Spektral.
Orange — Gelbgrün.	Gelb.	Spektral.
Gelb — Grün.	Gelbgrün.	Weisslich.
Gelbgrün — Blaugrün.	Grün.	Sehr weisslich.
Grün — Cyanblau.	Blaugrün.	Weisslich.
Blaugrün — Indigo.	Cyanblau.	Spektral.
Cyanblau — Violett.	Indigo.	Spektral.
Roth — Gelbgrün.	Orange oder Gelb.	Spektral.
Roth — Grün.	Orange oder Gelb oder Gelbgrün.	Weisslich.
Violett — Blaugrün.	Indigo oder Cyanblau.	Spektral.
Violett — Grün.	Indigo oder Cyanblau oder Blaugrün.	Weisslich.
Violett — Orange.	Roth.	Weisslich.
Roth — Cyanblau.	Indigo oder Violett.	Weisslich.
Roth — Indigo.	Violett.	Wenig weisslich.

Unter den Eindrücken, welche nach dieser Tabelle durch Zusammenwirken nicht komplementärer Strahlungen erzeugt werden, giebt es viele, die ganz genau ebenso auch durch Zusammenwirken eines anderen Strahlenpaares hervorgebracht werden können, z. B. der weisslich-orange Farbeneindruck den rothe und grüne Strahlen hervorbringen, kann auch erzeugt werden durch Zusammenwirken von Strahlen der Wellenlänge 0,00002244 Par. Z., die den Eindruck orange machen und von den komplementären[1] Strahlen der Wellenlänge 0,00001809 Par. Z., die den Eindruck Blau machen, wenn die Intensität der ersteren stark vorwiegt. Solcher Beispiele liessen sich noch unzählige geben, oder man kann sagen: Jeder bestimmte Farbeneindruck der durch ein Paar homogener Strahlen erzeugt wird, lässt sich auch noch durch unendlich viele verschiedene homogene Strahlenpaare hervorbringen.

1 Siehe Tabelle S. 189.

II. Symbolische Darstellung der gemischten Farben.

Diese ganze unendliche Mannigfaltigkeit der durch Paare homogener Strahlen erzeugbaren Farbeneindrücke lässt sich bezüglich der Stetigkeit des Ueberganges von einem zum andern und bezüglich ihrer Aehnlichkeit untereinander symbolisch darstellen durch das System aller Punkte des ebenen Flächenstückes, welches von der schon mehrfach gebrauchten Kurve Fig. 49 eingeschlossen ist. Die ganz eigenartige Empfindung weiss muss offenbar durch den Punkt dargestellt sein, welcher oben schon als Pol gewählt wurde, von welchem die Fahrstrahlen ausgehen, deren Winkeldistanz die Unterschiede des Farbentones der Spektralfarben misst. Die Punkte der Fahrstrahlen selbst stellen die verschiedenen blassen Farbentöne derart dar, dass der Abstand eines Punktes vom Pol den Grad der Sättigung andeutet, welcher sein Maximum erreicht wenn die Entfernung vom Pol die ganze Länge des betreffenden Fahrstrahles bis an die spektrale Grenzkurve ausmacht. Auf dem Fahrstrahl *Wm* also beispielsweise stellen sich alle Empfindungen dar, welchen man einen bestimmten blaugrünen Farbenton zuschreibt, von weiss an durch das blasseste Blaugrün mit steigender Sättigung bis zum spektralen Blaugrün. Auf dem Fahrstrahl *WV* stellen sich ebenso alle Empfindungen von einem gewissen rothen Farbentone dar, von weiss an durch die blassesten rothen Nuancen bis zum gesättigten Roth des Spektrums u. s. w.

Es ist gut zu bemerken, dass es ganz und gar der Natur der Sache entspricht, wenn man das Fortschreiten von Ton zu Ton durch Drehung einer Richtung um einen Punkt das Fortschreiten von blasseren Nuancen eines Tones zu gesättigteren aber durch Fortschreiten auf einer geraden Linie darstellt. Beim Fortschreiten von Ton zu Ton verlangt nämlich die innere Anschauung, dass man, ohne die schon durchlaufenen Töne zum zweiten Male zu passiren zum ursprünglichen Farbenton zurückkommt, z. B. von Gelb durch Grün, Blaugrün, Blau, Violett, Purpur, Roth, Orange wieder zu Gelb. Beim Fortschreiten von weiss durch blassere Nuancen zu immer gesättigteren desselben Tones verlangt die innere Anschauung nie, dass wir zu Eindrücken kommen könnten, welche dem ursprünglichen wieder ähnlicher werden.

Lässt man mehr als zwei homogene Strahlenarten in beliebiger Zusammenstellung auf dieselbe Netzhautstelle einwirken, so entsteht niemals ein Farbeneindruck, der nicht auch schon durch Zu-

sammenwirken zweier homogener Strahlenarten hervorgebracht werden könnte, d. h. ein Eindruck der einen bestimmten einer Stelle des Spektrum entsprechenden Farbenton aufweist und dessen Sättigung jedesfalls geringer ist als die der betreffenden Spektralstelle. Mit der symbolischen Darstellung der durch Paare homogener Strahlen erzeugbaren Farben oder Lichteindrücke in Form eines begrenzten ebenen Flächenstückes ist also die ganze Mannigfaltigkeit der möglichen Farbeneindrücke von den Intensitätsunterschieden abgesehen erschöpft. Es stellt sich somit die ganze Mannigfaltigkeit der überhaupt möglichen Farbeneindrücke als eine zweifach unendliche dar. Dies heisst mit andern Worten: Es ist erstens möglich eine stetige Reihe von Elementen der Mannigfaltigkeit zu durchlaufen und auf das erste Element zurückzukommen ohne dass man ein Element zweimal nimmt — hierdurch ist die unendliche Mannigfaltigkeit als eine mehr als einfache charakterisirt. Zweitens sind durch eine solche stetige Reihe von Elementen die sämmtlichen Elemente derart in zwei Gruppen geschieden, dass es nun nicht mehr möglich ist, von einem Elemente der einen zu einem Elemente der anderen Gruppe einen stetigen Uebergang zu machen ohne dass darin ein Element der zuerst gebildeten Reihe vorkommt, hierdurch ist die Mannigfaltigkeit als eine nicht mehr als zweifache charakterisirt. Dass diese beiden Eigenschaften dem System aller möglichen auf gleiche Intensität gebrachten Farbenempfindungen zukommt wird keines besonderen Beweises mehr bedürfen.

Es mag an dieser Stelle ausdrücklich hervorgehoben werden, dass keine Lichtempfindung sei sie weiss oder habe sie einen beliebigen Farbenton und einen beliebigen Sättigungsgrad sich im Bewusstsein als etwas zusammengesetztes ankündigt. Jede erscheint vielmehr als ein durchaus Einfaches und selbst dem aufmerksamsten Beobachter wird es nie gelingen eine solche Empfindung in Componenten zerlegt zum Bewusstsein zu bringen. Der Sprachgebrauch gewisse Farbenempfindungen durch zusammengesetzte Worte wie etwa Blaugrün zu bezeichnen, scheint manche zu der Annahme verführt zu haben, dass doch etwas Zusammengesetztes an der Wahrnehmung sei. Diese Annahme kann indessen nicht entschieden genug zurückgewiesen werden. Die Sprache bezeichnet durch die Zusammensetzung von zwei Farbennamen offenbar nur die gleichzeitige Aehnlichkeit mit zwei verschiedenen Farben. Wo ein Bedürfniss vorhanden war, hat daher die Sprache auch einfache Bezeichnungen für Farben eingeführt die ebensowohl durch zusammengesetzte Worte hätten bezeichnet werden können, z. B. Gelb. Dies könnte ganz passend durch

grünlichroth bezeichnet werden, denn die Aehnlichkeit des Gelb und Roth einerseits und des Gelb und Grün andererseits ist gewiss ebenso gross wie die Aehnlichkeit des Blaugrün und Grün einer- und des Blaugrün und Blau andererseits. Dass gleichwohl für die gelbe Farbe ein besonderer Name in Gebrauch kam, hat offenbar darin seinen Grund, dass bei der besonderen Reizbarkeit der Netzhaut für die Strahlenarten, welche eben diesen Eindruck machen, derselbe sich dem sprachbildenden Bewusstsein besonders häufig und mächtig aufdrängte.

Wenn nun auch jede Farbenempfindung in der inneren Anschauung als eine unauflösliche Einheit auftritt, so ist damit keineswegs erwiesen, dass sie in Wahrheit eine einfache Empfindung ist. Es treten ja niemals im Bewusstsein die elementaren Empfindungen selbst auf, sondern stets nur Vorstellungen, welche aus dem Empfindungsmaterial gebildet sind und es bedarf auf allen Sinnesgebieten besonderer Hülfen der Aufmerksamkeit, um den Empfindungselementen auf die Spur zu kommen. Sich ihrer als solcher wirklich bewusst zu werden, gelingt vielleicht überhaupt gar nie. Am weitesten geht wohl die Fähigkeit des Ohres die in einer Gesammtempfindung enthaltenen Elemente einzeln wahrzunehmen, weil es hier eben möglich ist, sie auch einigermaassen isolirt hervorzurufen. Anders dagegen auf dem Gebiete des Tastsinnes. Der Charakter einer Wärmeempfindung im Gegensatze zu dem einer Druckempfindung wird ohne Zweifel nur bedingt durch den verschiedenen Charakter der Gruppirung mehrerer Elementarempfindungen, aber wir sind nicht im Stande uns dieser Elementarempfindungen gesondert bewusst zu werden.

Die symbolische Darstellung der qualitativen Mannigfaltigkeit aller möglichen Lichtempfindungen durch die Mannigfaltigkeit der Punkte eines begrenzten ebenen Flächenstückes kann erfahrungsgemäss in einer sehr bemerkenswerthen Weise bewerkstelligt werden. Giebt man nämlich der Begrenzungslinie eine gewisse Gestalt und dem Pol eine gewisse Lage darin, so lässt sich, wenn die beiden Punkte, welche die durch zwei Strahlungen (einfache oder beliebig zusammengesetzte) für sich hervorgebrachten Empfindungen bedeuten und das Intensitätsverhältniss der beiden Strahlungen gegeben sind, nach einer einfachen Regel der Punkt finden, welcher die durch das Zusammenwirken dieser beiden Strahlungen auf dieselbe Netzhautstelle hervorgebrachte Empfindung bedeutet. Die Regel lautet so: Man denke sich an die beiden gegebenen Punkte Massen gesetzt, deren Verhältniss das der Intensitäten der beiden Strahlungen ist und kon-

struire den Schwerpunkt dieses Massensystemes, er ist der gesuchte Punkt. Es sei z. B. p Fig. 49 der eine und q der andere gegebene Punkt, das heisst wir denken uns eine Strahlung, welche den Eindruck eines nicht ganz gesättigten Orange macht und eine zweite, welche den Eindruck eines ebenfalls nicht ganz gesättigten etwas zum Grün neigenden Blau macht. Die eine sowohl als die andere dieser Strahlungen könnte immer noch in sehr verschiedener Weise aus homogenen Strahlen bestehen, worauf gar nichts ankommt. Lassen wir nun zwei solche Strahlungen zusammenwirken, so können erstens nur Eindrücke zu Stande kommen, welche auf der geraden Linie pq ihre Darstellung finden, da nur hier der Schwerpunkt der beiden hypothetisch zu setzenden Massen liegen kann. Es können also nur Eindrücke von weisslich orange weisslich roth weisslich purpur weisslich violett weisslich blau entstehen und ob der eine oder andere dieser Eindrücke entsteht, hängt vom Intensitätsverhältnisse der beiden Strahlungen ab. Wäre z. B. die orange Strahlung viermal so stark als die blaue, so wäre r der gesuchte Punkt und wir hätten den Eindruck eines ziemlich blassen Roth, denn der Punkt r liegt auf dem Fahrstrahl WV dessen Punkte nach dem dargelegten Princip die Eindrücke darstellen, welche von einem gewissen spektralen roth den Uebergang zu weiss bilden. Es versteht sich von selbst, dass die soeben entwickelte Regel auch auf die Construktion des Farbeneindruckes, den beliebig viele verschiedene homogene oder selbst schon gemischte Strahlungen zusammenwirkend hervorbringen, denn man kann zuerst für zwei den Schwerpunkt konstruiren und dann zu dem Resultat die dritte Strahlung hinzunehmen u. s. f.

III. Young's Theorie der Farbenempfindung.

Da es bei der Construktion des gemischten Farbeneindruckes gar nicht ankommt auf die physikalische Beschaffenheit der Strahlungen, welche in die Mischung eingehen, sondern lediglich auf die Farbeneindrücke, welche sie hervorbringen, so muss man schliessen, dass es sich dabei eben um das Zusammensein von physiologischen Zuständen der Netzhaut handelt gleichgültig, durch welche äussere Ursache dieselben bewirkt sind. Es kann daher kaum eine Hypothese sondern nur ein Ausdruck der Thatsachen genannt werden, wenn man überhaupt die verschiedenen Lichteindrücke als Zusammensein einiger weniger einfacher ansieht. Wie viele solche „Grundfarben“ man wähle und welche Farbentöne man ihnen beilegen will, bleibt allerdings in weiten Grenzen der Willkühr überlassen,

nur eine Bedingung muss erfüllt sein. Es müssen nämlich die den Grundfarben in unserer symbolischen Darstellung anzuweisenden Plätze die Eckpunkte eines Polygons bilden, das die von der ausgezogenen Curve und der punktirten Geraden begrenzte Fläche vollständig einschliesst, denn nur unter dieser Bedingung kann jeder Punkt dieses Flächenstückes Schwerpunkt eines in jenen Eckpunkten vertheilten Massensystemes sein, d. h. kann jede wirkliche Farbenempfindung als Zusammensein jener hypothetischen Grundempfindungen in bestimmtem Intensitätsverhältniss aufgefasst werden. Diese Bedingung schliesst wegen der unvermeidlichen Krümmung der das Spektrum darstellenden Linie den Satz ein, dass mindestens eine der Grundfarben vom Pol weiter abliegt, als die im Ton entsprechende Spektralfarbe d. h. gesättigter ist, als irgend ein durch wirkliche Strahlung in der unermüdeten Netzhaut hervorzubringender Farbeneindruck desselben Tones.

Wollen wir nun den Boden des rein Thatsächlichen verlassen, so können wir nach einer bestimmten möglichst wahrscheinlichen Annahme bezüglich der Zahl und des Tones der einfachen Farbeneindrücke suchen. Was zunächst die Zahl betrifft, so empfiehlt es sich natürlich sie auf die kleinste überhaupt genügende nämlich auf 3 zu beschränken. Hierin besteht die berühmte von Thomas Young aufgestellte Hypothese zur Erklärung der Farbenempfindung, welche neuerdings von Helmholtz und Maxwell weiter ausgebildet ist. Um den Ton der drei Grundfarben zu wählen, gehen wir davon aus, dass offenbar der grüne Farbenton eine besondere ausgezeichnete Stellung einnimmt schon dadurch, dass er im Spektrum keinen komplementären hat. Wenn man nun Grün als den Ton der einen Grundfarbe gewählt hat, so scheint mir die Wahl der beiden andern nur auf Roth und Blau fallen zu können, ich kann mich wenigstens nicht entschliessen mit Young und Helmholtz neben Grün und Roth Violett als dritte Grundfarbe gelten zu lassen, und zwar aus folgendem Grunde. Die drei Grundfarben sollten nämlich, wie mir scheint, so gewählt sein, dass die drei Unterschiede zwischen je einem derselben möglichst gleich gross sind. Nun wird aber Niemand zweifelhaft sein, dass der Unterschied zwischen Roth und Violett viel kleiner ist als der zwischen Roth und Grün und als der zwischen Grün und Violett. Nimmt man dagegen als dritte Grundfarbe Blau und zwar genauer gesprochen einen der als Indigo gemeiniglich bezeichneten Töne, so tritt dieser Missstand nicht in dem Maasse hervor. Zwischen Roth und Blau ist wohl nach dem allgemeinen Urtheil der Unterschied ebenso gross wie zwischen Blau und Grün. Dagegen dürften

manche den Unterschied zwischen Roth und Grün grösser schätzen, was aber vielleicht nur dem weiter oben schon berührten Umstand zuzuschreiben ist, dass sich wegen der besonderen Reizbarkeit der Netzhaut durch die betreffenden Strahlenarten die gelben Farbentöne der Aufmerksamkeit besonders häufig und stark aufdrängen. Als rothen Grundton möchte ich nicht sowohl den des äussersten spektralen Roth, das immerhin schon etwas zum Gelb (resp. Grün) hinneigt annehmen, sondern einen Farbenton der etwas mehr Aehnlichkeit mit Carminroth hat.

Hiernach wären den Grundempfindungen auf unserer Farbentafel Plätze anzuweisen in den Eckpunkten RGB eines gleichseitigen Dreieckes, welches das von der Spektralkurve und der Purpurlinie begrenzte Flächenstück vollständig einschliesst. Wie weit von W entfernt man die: Punkte B, G und R auf ihren Fahrstrahlen setzen will, das bleibt freilich immer noch der Willkühr überlassen, ohne dass man einen Widerspruch gegen Thatsachen zu befürchten hätte. Es empfiehlt sich also die einfachste Annahme, d. h. die Punkte nur so weit hinauszurücken, dass das Dreieck GRB gerade eben die Fläche der wirklichen Farben vollständig einschliesst. Es verdient noch ausdrücklich erwähnt zu werden, dass die Repräsentation die drei Grundempfindungen durch drei Punkte (R, G, B) die von W gleich weit abstehen soviel heisst als annehmen, dass der Eindruck weiss dann entsteht, wenn die drei Grundempfindungen in gleicher Stärke vorhanden sind, denn der Schwerpunkt dreier Massen in R, G und B liegt alsdann in W nur, wenn die drei Massen gleich sind.

Der soeben entwickelten Hypothese hat schon Young selbst eine weitere anatomisch physiologische Bedeutung gegeben, die mit den oben ausgesprochenen Grundsätzen der allgemeinen Empfindungslehre im Einklang steht. Er nimmt nämlich an, dass in jedem Netzhauttheil, der aller Farbenempfindungen fähig ist, drei getrennte Nervenelemente vorhanden sind, die als ebensoviele Individuen gesondert empfinden und zwar in qualitativ verschiedener Weise, wie das eben für individuell verschiedene Nervenelemente und nur für solche möglich ist. Der einen Elementenart käme eben die specifische Energie des Grünempfindens zu, der andern die des Roth- und der dritten die des Blauempfindens. Es mag übrigens hier noch einmal ausdrücklich bemerkt sein, dass die drei Empfindungen, welche bei ausschliesslicher Reizung nur je einer Fasergattung zu Stande kommen würden, uns eigentlich unbekannt sind, da faktisch jede Strahlung, sei sie homogen, sei sie gemischt, keine der Fasergattungen ganz uner-

regt lässt. Wir bezeichnen die unbekannten hypothetischen Grundempfindungen nur mit den Namen der bekannten Farben, welchen sie im Sinne der Hypothese am ähnlichsten sein müssen. Bei dem sehr verwickelten Bau der kleinsten Netzhautpartieen wird die anatomische Möglichkeit der YOUNG'schen Annahme kaum bestritten werden können. Andererseits kann es auch keinen Einwand gegen diese Hypothese begründen, dass wir die totale Farbenempfindung einer Netzhautstelle nicht im Stande sind im Bewusstsein zu zergliedern, in ein räumliches Nebeneinander einer Grün-, einer Roth-, einer Blauempfindung, was doch die totale Farbenempfindung nach YOUNG's Hypothese in Wirklichkeit wäre. Die Möglichkeit einer solchen Zergliederung im Bewusstsein könnten wir nur dann erwarten, wenn es ausführbar wäre die drei specifisch verschieden empfindenden Elemente eines Netzhauttheiles von merklich verschiedenen Orten her zu erregen, resp. durch Bewegungen des Organes abwechselnd das eine oder das andere dieser Elemente demselben Reize darzubieten. Da dies aber wegen der Kleinheit des Abstandes zwischen den drei Elementen jedes Netzhauttheiles unausführbar ist, so tritt der Complex der drei Grundempfindungen stets als unauflösliche Einheit ins Bewusstsein, deren Qualität einer zweifach unendlichen Mannigfaltigkeit fähig ist, da sie von zwei stetig veränderlichen Grössen abhängt, nämlich den beiden Intensitätsverhältnissen der einen Grundempfindung zu den beiden andern.

Um den ganzen in der symbolischen Darstellung Fig. 49 niedergelegten Thatbestand der Lehre von den Farbenempfindungen aus der YOUNG'schen Theorie zu erklären, hat man noch folgende Annahme zu machen. Jede der drei Fasergattungen hat ihre eigenthümlichen Endapparate, deren Reizbarkeit durch Strahlungen eine verschiedene ist, derart dass die rothempfindenden Fasern besonders stark durch die Strahlen des Spektrums von geringer Brechbarkeit gereizt werden. Die grünempfindenden Fasern werden am stärksten erregt durch Strahlen mittlerer Brechbarkeit, die blauempfindenden am stärksten durch die stark brechbaren Strahlen.

Hat man eine Farbentafel nach dem Schema der Fig. 49 konstruirt, an welcher Alles lediglich Ausdruck von Thatsachen ist bis auf die drei Grundempfindungspunkte B, R, G, so kann man sofort drei Curven konstruiren, deren Abscissen die Schwingungszahlen der homogenen Strahlen bedeuten und deren Ordinaten die Stärke des Empfindens bedeuten, welche durch die verschiedenen Strahlen, wenn sie mit der Intensität 1 wirken, in den drei Fasergattungen erregt wird. Die Intensität 1 ist dabei so zu verstehen, dass dieselbe eine Gesammt-

empfindung von der Intensität 1 hervorruft. So sind in der Fig. 52 die Curven *RR*, *GG*, *BB*[1] nach den Maassen der Farbentafel Fig. 49

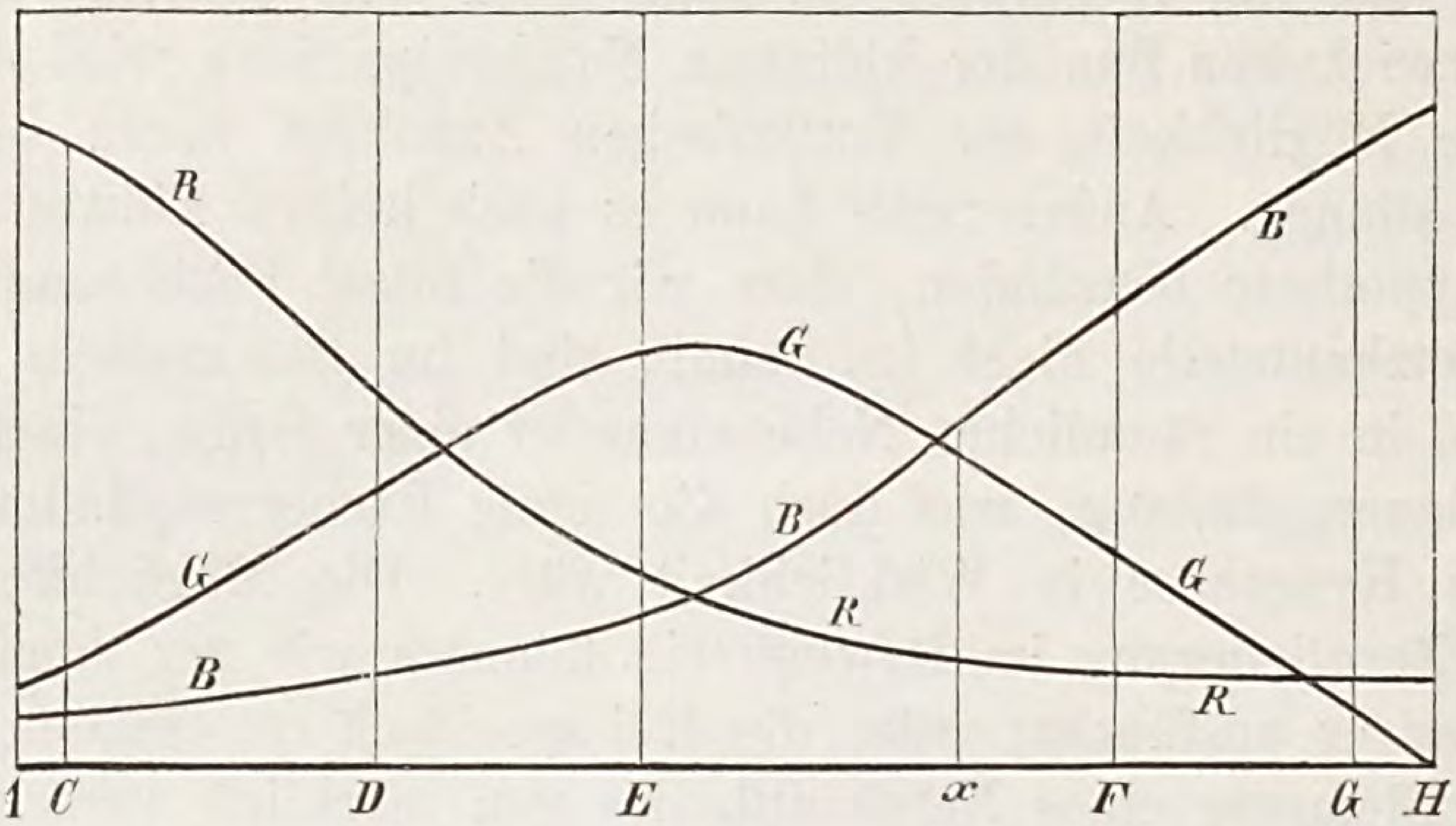


Fig. 52.

entworfen. Um ihre Richtigkeit auf die Probe zu stellen, sehen wir zu ob sie die Beziehungen der Complementärfarben erklären. Wir wissen dass die der Fraunhofer'schen Linie *C* entsprechende Strahlung komplementär ist zu der Strahlung, welche einer gewissen zwischen der Linie *E* und *F* entspricht. Es müssen also die drei Ordinaten über *C* in gleichem Verhältniss verkleinert addirt zu den entsprechenden Ordinaten über einem gewissen Punkte zwischen *E* und *F* (es mag etwa der Punkt *x* sein) drei gleiche Summen ergeben, da ja nach den gemachten Feststellungen der Eindruck weiss nichts anderes bedeutet als gleiche Erregung der drei Fasergattungen. Dass man die Ordinaten über *C* in einem gewissen Verhältniss verkleinern muss, entspricht der Thatsache, dass zur Empfindung Blaugrün mit der Intensität 1 complementär ist, die Empfindung Roth nicht in der Intensität 1, sondern in viel kleinerer. Nun zeigen die drei Ordinaten über *C* mit $^9/_{22}$ multiplicirt die Längen der drei Linien $r_1 r_2$ $g_1 g_2$ $b_1 b_2$ (Fig. 53) und die Ordinaten über *x* sind in ihrer ganzen Länge gleich Rr_1 Gg_1 Bb_1 die Summen Rr_2 Gg_2 Bb_2 sind daher untereinander gleich, wie es die Beziehung des Complementärseins der den Punkten *C* und *x* der Abscissenaxe entsprechenden Strahlungen verlangt.

[1] Die hier gegebenen Kurven für die Reizbarkeit der drei hypothetischen Arten von Faserenden weichen wesentlich ab von denen, welche Maxwell und Helmholtz (Physiol. Optik. Fig. 119. S. 291) gegeben haben und welche vielfach reproducirt sind. Der Unterschied ist aber nicht bedingt durch einen principiellen Unterschied der Auffassung, sondern dadurch, dass Maxwell und Helmholtz gleiches Maass der physikalischen Strahlungsenergie voraussetzen, ich dagegen gleichen physiologischen Gesammteffekt.

Für das Verständniss der in den letzten Paragraphen entwickelten Theorie ist es gut noch einen Satz ausdrücklich auszusprechen, von dem in den Entwickelungen eigentlich schon stillschweigend Gebrauch gemacht ist. Er lautet so: der Erregungszustand in jeder Fasergattung ist unabhängig von dem in den beiden andern und wenn ein zusammengesetzter Reiz die Netzhaut trifft, so ist die Erregung jeder Faserart die Summe der Erregungen, welche die Componenten des Reizes für sich darin hervorbringen würden.

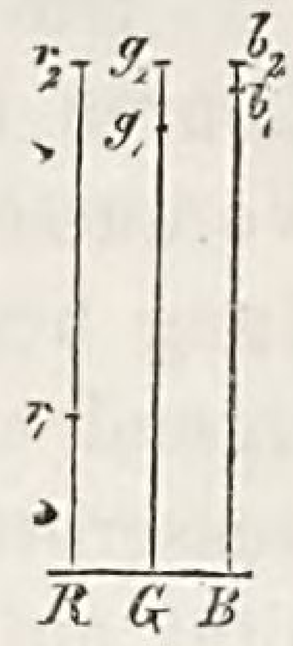


Fig. 53.

Wir haben gesehen dass die bis hierher zur Sprache gebrachten Thatsachen der Farbenempfindung sämmtlich aus der Theorie YOUNG's erklärt werden. Sie ist aber im Stande auch noch eine Fülle anderer Erscheinungen zu erklären, von denen im weiteren Verlaufe der Darstellung zu handeln sein wird. Ueberhaupt ist mir nur eine einzige Thatsache dieses Gebietes bekannt, welche nicht auf das Ungezwungenste aus der YOUNG'schen Theorie gefolgert werden könnte. Sie besteht darin, dass jede Strahlung die einen noch so gesättigten Farbeneindruck macht, sowie sie eine einigermaassen ausgedehnte polare Netzhautpartie trifft, einen weisslichen Eindruck hervorbringt, in welchem oft gar kein Farbenton mehr zu erkennen ist, wenn ihre Wirkung auf eine sehr kleine Netzhautpartie beschränkt wird. So giebt es bekanntlich viele Sterne deren Strahlung der spektroskopischen Untersuchung zufolge einen sehr entschieden farbigen Eindruck machen sollte, und dennoch sehen dieselben wie weisslich glänzende Punkte aus, an denen der Farbenton kaum erkennbar ist. An farbigen terrestrischen Objekten hat namentlich AUBERT[1] planmässige Versuche gemacht, die zeigen, dass, sowie der Gesichtswinkel, unter welchem sie erscheinen, unter eine gewisse Grenze sinkt, kein Farbenton mehr erkennbar ist. Dass hiervon die Theorie YOUNG's so unmittelbar wenigstens nicht Rechenschaft giebt, bedarf keines besonderen Beweises. Ebensowenig kann YOUNG's Theorie die hierhergehörige Beobachtung E. FICK's[2] erklären, dass an mehreren getrennt nebeneinander gesehenen sehr kleinen farbigen Objekten der Farbenton oft noch erkannt wird, wenn er an einem einzigen unter demselben Gesichtswinkel erscheinenden Objekte nicht mehr erkannt werden kann.

1 AUBERT, Physiologie der Netzhaut. 2. Abschn. 1. Cap. Breslau 1864.
2 E. FICK, Arch. f. d. ges. Physiol. XVII. S. 152.

IV. Farbenton abhängig von der Stärke des Reizes.

Die sämmtlichen in den vorstehenden Paragraphen dargestellten Lehren haben nur unter der noch nicht ausdrücklich ausgesprochenen Voraussetzung Geltung, dass die Strahlung, welche die Lichtempfindung hervorruft, einen mittleren Intensitätsgrad besitzt. Lässt man irgend eine Strahlung, sei sie homogen oder gemischt entweder in ausserordentlich geringer oder in enorm grosser (blendender) Intensität auf die Netzhaut wirken, so entsteht eine Lichtempfindung ohne bestimmbaren Farbenton, d. h. die Empfindung weiss, die man bei geringem Intensitätsgrade bekanntlich grau nennt. Was die Richtigkeit des Satzes bezüglich der minimen Intensitätsgrade betrifft, so wird sie schon durch das alte Sprichwort „bei Nacht sind alle Katzen grau" bewährt. Doch ist es von Interesse zu untersuchen, welche Farbentöne bei abnehmender Intensität zuerst aufhören erkennbar zu sein. Ausgedehnte Versuchsreihen hat hierüber AUBERT [1] mit Pigmentfarben angestellt, von deren Ergebnissen besonders das hervorzuheben ist, dass am Zinnoberroth bei geringerer Beleuchtungsstärke schon ein Farbenton erkennbar ist als am Ultramarinblau, dass aber dies letztere heller erscheint als jenes, obwohl bei mittlerer Tageshelligkeit das Zinnoberroth entschieden den helleren Eindruck macht.

Lässt man eine homogene Strahlung in ausserordentlicher Helligkeit wirken, so geht am leichtesten Violett in weiss über. Die anderen Farbentöne gehen bei Steigerung der Helligkeit meist mit Aenderung ihres Tones ebenfalls in weiss über und zwar nimmt merkwürdigerweise diese Aenderung des Tones bei verschiedenen eine entgegengesetzte Richtung. Blau nämlich geht durch blass violett in weiss über, Grün durch gelblichgrün. Der rothe Farbenton wird blassgelblich und es gelingt nach HELMHOLTZ selbst bei der blendendsten Helligkeit nicht ihn vollständig in weiss überzuführen.

Diese sämmtlichen Erscheinungen sind ohne allen Zwang mit der YOUNG'schen Theorie zu vereinigen. Man braucht nur die durchaus plausibele Annahme zu machen, dass bei äusserst geringen und äusserst hohen Intensitätsgraden der Strahlen die Erregbarkeitskurven der drei Fasergattungen nicht mehr den Fig. 52 gezeichneten Gang einhalten, sondern nahe zusammenfallen. Noch genauer könnte man den Thatbestand graphisch darstellen, wenn man für jede Strahlenart drei Kurven konstruirte den drei Fasergattungen entsprechend deren Abscissen die Intensität der Strahlenart repräsentiren und deren

1 AUBERT, Physiologie der Netzhaut. 2. Abschn. 2. Cap.

Ordinaten die durch die Strahlenart bei ihren verschiedenen Intensitätsgraden in den einzelnen Fasergattungen hervorgebrachte Erregungsstärke darstellen. In Fig. 54 ist eine solche Darstellung ver-

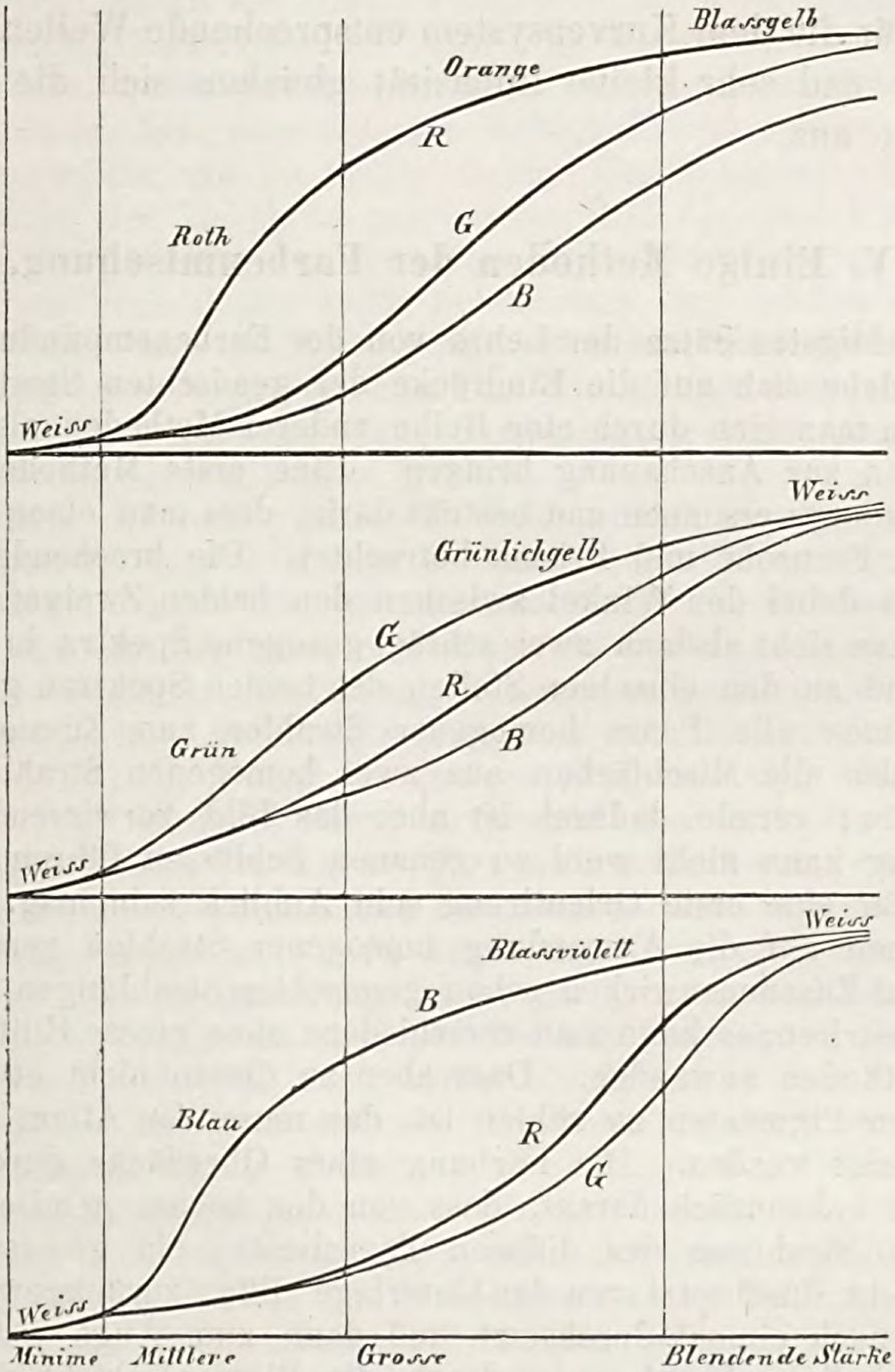


Fig. 54.

sucht. Das Kurvensystem RGB über der ersten Abscissenaxe stellt die Erregbarkeit der Roth, Grün und Blau empfindenden Fasergattung dar als Funktion der Stärke einer Strahlung die in mittlerer Stärke den Eindruck Roth macht also etwa der Strahlung, welche der FRAUNHOFER'schen Linie C entspricht. Das Kurvensystem über der zweiten Abscissenaxe bezieht sich ebenso auf eine Strahlung die bei mittlerer Stärke den Eindruck Grün macht, die also etwa dem Theile des Spektrums zwischen E und F entspricht. Das dritte Kurvensystem gilt ebenso für Strahlen die bei mittlerer Stärke den

Eindruck blau machen, etwa entsprechend der Linie *G* des Spektrums. Die 3 Ordinaten jedes Kurvensystems stehen in dem Intervalle, welches unten als mittlere Stärke bezeichnet ist, in demselben Verhältnisse untereinander wie die Ordinaten der Kurven *R*, *G*, *B* in Fig. 52 für die dem Kurvensystem entsprechende Wellenlänge. Für sehr grosse und sehr kleine Intensität gleichen sich die Ordinatenunterschiede aus.

V. Einige Methoden der Farbenmischung.

Die wichtigsten Sätze der Lehre von der Farbenempfindung namentlich die, welche sich auf die Eindrücke der gemischten Strahlungen beziehen, kann man sich durch eine Reihe anderer Methoden als der bisher beschriebenen zur Anschauung bringen. Eine erste Methode dieser Art ist von Helmholtz ersonnen und besteht darin, dass man einen V-förmigen Spalt durch Fernrohr und Prisma betrachtet. Die brechende Kante des Prisma muss dabei den Winkel zwischen den beiden Zweigen des Spaltes halbiren. Man sieht alsdann zwei schräg gezogene Spektra in theilweiser Deckung und an den einzelnen Stellen des beiden Spektren gemeinsamen Feldes kommen alle Paare homogener Strahlen zum Zusammenwirken. Man sieht also alle Mischfarben aus zwei homogenen Strahlen zugleich nebeneinander; gerade dadurch ist aber das Bild verwirrend und seine Zergliederung kann nicht wohl zu genauen Schlüssen führen, so belehrend auch für eine erste Orientirung sein Anblick sein mag.

Will man auf die Anwendung homogener Strahlen verzichten und bloss die auf Zusammenwirken schon gemischter Strahlungen bezüglichen Sätze demonstriren, so kann man verschiedene ohne grosse Hülfsmittel ausführbare Methoden anwenden. Dass aber zu diesen nicht etwa die Vermengung von Pigmenten zu zählen ist, das muss vor Allem mit einigen Worten gezeigt werden. Die Färbung einer Oberfläche durch ein Pigment beruht bekanntlich darauf, dass von der höchst gemischten (weiss aussehenden) Strahlung des diffusen Tageslichtes ein grosser Theil die Pigmentschicht durchsetzt von der Unterlage diffus zurückgeworfen wird, die Schicht noch einmal durchsetzt und dann zum Auge gelangt. Bei diesem zweimaligen Durchgange durch die Pigmentschicht werden nun Strahlen von gewissen Brechbarkeitsstufen besonders absorbirt und der Rest wird also einen mehr oder weniger gesättigten Farbeneindruck machen. Mengt man noch ein zweites Pigment dem ersteren bei, so hat das Licht beide zu durchsetzen und es werden der Strahlung, welche bei der Absorption im ersten übrig bleibt, noch weitere Antheile durch die Absorption im zweiten entzogen. Dies ist also nicht ein Weg, auf welchem man über das Zusammenwirken verschiedener Strahlenarten etwas erfahren kann. Es erscheint auch ein Gemenge zweier Pigmente stets dunkler als jedes Einzelne. Dem Vertrauen auf die Ergebnisse der Pigmentmengung verdankt der früher weit verbreitete Irrthum seine Entstehung, dass Gelb aussehendes und Blau aussehendes Licht zusammenwirkend den Eindruck Grün machten. Es trifft sich nämlich zufällig, dass

sowohl die gelben als die blauen Pigmente meist sehr erhebliche Mengen grün aussehendes Lichtes durchlassen, dass also dieses gerade übrig bleibt, wenn man Weiss aussehendes Licht gleichzeitig der Sichtung durch das gelbe und das blaue Pigment unterwirft.

Eine ebenso artige als einfache Methode um zwei Strahlungen auf der Netzhaut zusammenwirken zu lassen, die von verschiedenen gefärbten Oberflächen diffus zurückgeworfen werden, ist von Helmholtz angegeben und besteht darin, dass man die eine farbige Fläche schräg durch eine Glasplatte betrachtet und die zweite farbige Fläche so legt, dass ihr von der Vorderfläche der Glasplatte gespiegeltes Bild die erste Fläche deckt. Verschiedene Verhältnisse der Intensität beider Strahlungen kann man entweder durch verschieden helle Beleuchtung der beiden Flächen erzielen oder, indem man mehr oder weniger schräg durch die Glasplatte hindurchschaut. Die Vergrösserung des Winkels nämlich zwischen der Blickrichtung mit der Normale zur Glasplatte verstärkt die reflektirten und schwächt die durchfallenden Strahlen.

Bei weitem die vorzüglichste Methode zur Mischung von Pigmentfarben ist aber die rotirende Scheibe mit verschieden farbigen Sektoren. Da sie allein im Stande ist, genaue numerische Ergebnisse zu liefern. Sie gründet sich auf folgenden erst später zu beweisenden merkwürdigen Satz der Physiologie der Netzhaut. Wenn eine Netzhautstelle in regelmässiger periodischer Aufeinanderfolge von verschiedenen Strahlungen getroffen wird und die Dauer der ganzen Periode unter einer gewissen Grenze (etwa $^1/_{25}$ Sekunde) liegt, so kommt qualitativ und quantitativ die Empfindung zu Stande, welche auch zu Staude käme, wenn die verschiedenen Strahlenarten andauernd zusammenwirkten und zwar jede mit einer Intensität, welche sich misst durch den Quotienten ihrer jedesmaligen Dauer dividirt durch die Dauer der ganzen Periode.

Bewerkstelligt man also den periodischen Vorgang in der Art, dass man verschiedene Sektoren einer mehr als 25 mal in der Sekunde umlaufenden Scheibe mit verschiedenen Pigmenten bedeckt, so ist als Intensität einer Strahlung in Rechnung zu bringen der Centriwinkel des diese Strahlung aussendenden Sektors dividirt durch 360°. Natürlich ist dieser Quotient noch zu multipliciren mit einer Zahl, welche die specifische Helligkeit des Sektors im Verhältniss zu den Helligkeiten der anderen in derselben Versuchsreihe gebrauchten Sektoren ausdrückt.

Um auf der rotirenden Scheibe zwei verschiedene Gemische zu vergleichen steckt man auf dieselbe Axe eine grössere und eine kleinere Scheibe jede aus verschiedenen Sektoren gebildet, dann sieht man auf der Randzone das eine, in der Mitte, soweit die kleinere Scheibe reicht, das andere Gemisch, und kann eine sehr genaue Vergleichung anstellen.

Um die Winkel der Sektoren leicht beliebig verändern zu können nimmt man von jeder Farbe eine ganze Scheibe aus dünnem Pappdeckel, die aber längs eines Radius aufgeschlitzt ist. Man kann dann zwei oder mehrere so ineinander stecken, dass sie im Ganzen zusammenfallen, aber von den verschiedenen Scheiben auf der Vorderseite Sektoren sichtbar werden, deren Verhältniss durch Verdrehen beliebig verändert werden kann. Zur Vervollständigung gehören noch weisse und schwarze Scheiben. Die letzteren dienen dazu den gesammten Lichteindruck der durch

die ganze Periode hervorgebracht wird, zu schwächen, sofern man annimmt — was freilich nur annähernd richtig ist — dass ein schwarzer Sektor gar keine Strahlung aussendet.

Hat man die verschiedenfarbigen Sektoren der grösseren Scheiben so vertheilt, dass die Mischung den Eindruck weiss giebt, und will dies mit dem Weiss vergleichen, welches die von einem Papierblatte ausgesandte Strahlung hervorbringt, so darf man die kleinere Scheibe nicht ganz weiss lassen, denn alle farbige Papiere senden bei gleicher Beleuchtung viel schwächere Strahlungen im ganzen aus als weisses Papier und die weisse Mischfarbe der Randzone z. B. aus roth grün und blau wird viel schwächer leuchtend erscheinen als das weisse Papier in der Mitte. Schwächeres Weiss nennt man aber neben hellem weiss „grau". Um das Weiss der kleineren Vergleichsscheibe auf dieselbe Stufe der Helligkeit abzudämpfen wie das Mischweiss der Randzone, muss man daher, wenn sie aus weissem Papier besteht, einen mehr oder weniger grossen Sektor derselben mit schwarz zudecken. Sie zeigt dann beim Drehen auch ein „grau", welches nach einigem Probiren mit verschiedenen Verhältnissen des schwarzen und weissen Sektors leicht dem Mischgrau der Randzone völlig gleich gemacht werden kann.

Dieser Umstand hat vielfach Bedenken gegen die Beweiskraft der Versuche mit der Drehscheibe veranlasst. Namentlich ist der Spott berühmt geworden, welchen Goethe nicht müde wurde an dem „abscheulichen Grau" auszulassen, welches die Physiker für weiss ausgäben. Um solchen Missverständnissen zu begegnen, kann man eine sehr artige Demonstration machen. Es kommt eben nur darauf an, die gedrehte Farbenscheibe mit einer weiss gebenden Mischung auf eine für den Zuschauer unsichtbare Weise zu beleuchten und daneben ein von ihm für weiss anerkanntes Papierblatt in schwächere Beleuchtung zu bringen. Man kann dies sehr leicht auf folgende Weise veranstalten, so dass es einer beliebigen Zuschauerzahl zugleich sichtbar ist. Auf die wagrechte Axe wird nur eine Scheibe gesteckt mit zwei oder drei farbigen Sektoren, welche weiss geben. Nahe davor stellt man senkrecht also parallel mit der Farbenscheibe ein Blatt von weissem Pappdeckel mit einem Loch, durch welches ein Theil der Farbenscheibe zu sehen ist, jedoch darf weder die Axe noch der Rand sichtbar werden. Die Hinterseite des Pappdeckels bildet nun ein Spiegel, welcher auf die Farbenscheibe starkes z. B. Sonnenlicht reflektirt, während die Vorderseite des weissen Pappdeckels schwächer beleuchtet ist. Wird jetzt die Scheibe gedreht, so kann man bei geeigneten Beleuchtungsverhältnissen das durch das Loch gesehene Mischweiss dem Weiss des Pappdeckels gleich oder auch noch viel heller erscheinen lassen. Diese Demonstration dürfte sich namentlich für akademische und andere Vorträge empfehlen.

Ausführliche Anweisung zur Construktion der Farbenempfindungen in Form einer Tafel nach Art der Fig. 49 auf Grund von Versuchen mit der Drehscheibe findet man bei Helmholtz und Maxwell.

VI. Hering's Theorie der Farbenempfindung.

In neuerer Zeit ist versucht worden die YOUNG'sche Theorie von der Mannigfaltigkeit der Farbenempfindungen durch eine andere [1] zu ersetzen. Wenn ich auch diesen Versuch durchaus nicht für gelungen halte, so kann er doch hier nicht ganz mit Stillschweigen übergangen werden, da er eine zu namhafte Autorität auf dem Gebiete der physiologischen Optik nämlich HERING zum Urheber hat und wie es scheint in weiten Kreisen Beifall findet. Eine Darstellung geschweige denn eine Widerlegung dieser Theorie bin ich nicht im Stande zu versuchen, da ich offen bekennen muss, dass ich dieselbe nicht verstehe. Jede Theorie der Farbenempfindung muss nämlich offenbar von gewissen Thatsachen der inneren Anschauung ausgehen, die von Jedem mit normalem Gesichtsinne begabten Menschen ohne Weiteres anerkannt werden. Schon dies trifft nun wenigstens für mich bei HERING's Theorie nicht zu. Er behauptet nämlich die Veränderung des Empfindens von Weiss durch Grau zu Schwarz — wie es also beispielsweise stattfinden würde bei allmählicher Abminderung der Beleuchtung eines betrachteten weissen Papierblattes bis zu Null — sei eine qualitative Aenderung analog derjenigen, welche eintritt, wenn ich eine Fläche an dem Auge vorübergehen lasse, deren Theile mit verschiedenen allmählich in einander übergehenden Farbentönen gemalt ist.[2] Ich kann dies nicht zugeben. Ich finde in meinem Bewusstsein nur eine quantitative Aenderung ein und derselben Empfindung, wenn ich die Beleuchtung eines weissen Papierblattes im Gesichtsfelde allmählich vermindere bis es zuletzt schwarz erscheint, oder auf sonst eine Art alle Schattirungen des Grau bis zum Schwarz aufeinanderfolgen lasse. Ich finde diesen Vorgang durchaus demjenigen analog, wo ein bestimmter Klang mit abnehmender Intensität gehört wird bis er zuletzt in vollständiger Stille verschwindet. Dass das Wort Schwarz die Abwesenheit jeder Lichtempfindung und nicht eine Empfindung von bestimmter Qualität und variabeler Intensität bezeichnet geht auch daraus hervor, dass man von jeder beliebigen Lichtempfindung z. B. einer rothen oder grünen genau ebenso durch stetiges Abmindern ihrer Intensität zu schwarz gelangen kann wie von einer weissen.

Ganz direkt und thatsächlich muss ich aber HERING widersprechen wenn er[3] behauptet: „Gleichwohl ist es eine Thatsache der alltäglichen Erfahrung, welche ich jedoch nirgends besonders betont gefunden habe, dass die eigentlich schwarze Empfindung erst unter dem Einflusse des äusseren Lichtreizes zu Stande kommt". „Man lege — fährt er zum Zwecke des Beweises fort — auf einen beliebigen Tisch ein Stück schwarzen Sammets und stelle sich so davor, dass es nicht glänzend erscheint, dann wird man ein ziemlich tiefes Schwarz sehen. Nun schliesse und verdecke man die Augen und vergleiche die Farbe des Gesichtsfeldes mit dem soeben gesehenen Schwarz: man wird zugeben müssen, dass die allerdings

1 E. HERING, Zur Lehre vom Lichtsinne. 6 Mittheilungen. Sitzgsber. d. Wiener Acad. 1872. Juni 1873. Dec. 1874. März. April. Mai.

2 Ibidem 1874. März. Seite 4 des Separatabdruckes.

3 Ibidem 1874. März. Seite 13 des Sonderabdruckes.

auch dunkle Farbe des Gesichtsfeldes dem Schwarz des Sammets nicht nahe kommt, möge man die Augen auch noch so lange geschlossen halten". Dies ist es eben, was ich durchaus bestreiten muss. Ich finde nämlich unter den angegebenen Umständen, dass auf der Netzhautstelle, welche dem Bilde des schwarzen Sammets entspricht, bei Verdeckung der Augen genau derselbe Empfindungszustand nämlich der fast völlige Mangel jeder Lichtempfindung einfach fortbesteht. Mir scheint zugleich in dieser thatsächlich irrigen Behauptung der Schlüssel dafür zu liegen, wie HERING zu der seltsamen Einreihung des Schwarz unter die positiven Farbenempfindungen verführt wurde. Während er sich sehr entschieden verwahrt gegen den Fehler, den er anderen Darstellern der Farbenempfindungslehre — meines Erachtens mit Unrecht — vorwirft, sie vermengten die Farbenempfindung mit den physikalischen Vorgängen, durch die sie hervorgerufen werden, verfällt er in den Fehler, die Farbenempfindung zu vermengen mit der Vorstellung eines farbigen Objektes, welche an die Farbenempfindung vom Verstande angeknüpft wird. Nur so ist es zu verstehen, dass dem Schwarz die rein negative Bedeutung abgesprochen wird. In der That entsteht die positive Vorstellung von einem schwarzen Objekte nur dann, wenn neben empfindungsleeren Netzhautstellen andere mit Farbenempfindungen erfüllt sind, und nicht wenn die Augen geschlossen und verdeckt sind. Wenn man sich klar macht mit welcher Gewalt namentlich gerade auf dem Gebiete des Gesichtssinnes der seelische Mechanismus wirkt, welcher aus dem Empfindungsmaterial sofort die Vorstellungen äusserer Objekte aufbaut, so ist es begreiflich wie schwer dieser Fehler zu vermeiden ist.

VII. Farbenblindheit.

Die in den vorigen Paragraphen erörterte Mannigfaltigkeit der Farbenempfindungen besteht nur, wenn es sich um Reizung von Netzhautelementen in der Polarzone handelt. Sowie das gereizte Element nur einige Millimeter von der Fovea centralis entfernt liegt, so ist es im Allgemeinen einer solchen Mannigfaltigkeit verschiedener Empfindungen nicht fähig. Es sind nur noch zwei Farbentöne nämlich gelb und blau zu unterscheiden, und die Mannigfaltigkeit aller möglichen Lichtempfindungen reducirt sich auf die Schattirungen des Gelb von mehr gesättigtem durch die blasseren bis weiss und von da durch blasse Schattirungen des Blau bis zu mehr gesättigtem Blau, und auf dem Gebiete dieser Mannigfaltigkeit ist, — was besonders betont werden muss — absolut kein stetiger Uebergang von einer gelben zu einer blauen Schattirung ausführbar, der nicht durch weiss hindurchginge. Die Mannigfaltigkeit ist also eine einfach unendliche und wäre graphisch darzustellen durch eine Linienstrecke ohne Ausdehnung in der zweiten Dimension.

Alle Strahlungen seien sie homogen oder gemischt, die am Pol

den Eindruck des Roth, des Gelb oder des Grün hervorbringen, machen auf der in Rede stehenden Zone den Eindruck des Gelb und zwar um so blasser, je grüner der Eindruck auf der Polarzone ist. Alle Strahlungen welche auf dieser den Eindruck des Blau und Violett hervorbringen, machen auf jener äusseren Zone den Eindruck des Blau und zwar ebenfalls um so blasser, je näher der Eindruck auf der Polarzone dem Grün kommt. Strahlungen die auf der Polarzone den Eindruck Blaugrün machen, sehen auf der äusseren weiss aus.

Noch weiter seitwärts gelegene Netzhautstellen bieten gar keine qualitativen Verschiedenheiten der Lichteindrücke dar. Jede Reizung derselben führt zur Empfindung weiss und es sind nur noch quantitative Unterschiede derselben möglich.

Die Grenzen dieser drei Netzhautzonen sind nicht ganz scharf, vielmehr schrumpft die zweifach unendliche Farbenmannigfaltigkeit der Polarzone allmählich aber ziemlich rasch zu der einfach unendlichen der mittleren und diese allmählich zur Unterschiedslosigkeit der Randzone zusammen. Sehr merkwürdig ist noch die Thatsache, dass die Ausdehnung der Zonen von verschiedenem Farbenunterscheidungsvermögen abhängig ist, von der Grösse des Netzhautbildes des farbigen Objektes. Die Farben werden nämlich um so weiter seitwärts noch vollständig oder theilweise erkannt, je grösser das Netzhautbild des farbigen Objektes ist. Bei überaus kleinem Netzhautbilde wird, wie schon oben (S. 199) erwähnt wurde, selbst mit der Polarzone der Netzhaut keine Farbe mehr unterschieden. Wenn man diese Schwierigkeit einstweilen bei Seite lässt, kann auch von dem mangelhaften Farbensinne der Seitentheile der Netzhaut die Young'sche Theorie sehr leicht Rechenschaft geben.

Es dürfte zu diesem Zwecke am natürlichsten folgende Hypothese [1] zu machen sein. Die drei specifisch verschieden empfindenden Fasergattungen sind auf der ganzen Netzhaut gleichmässig vertheilt, aber ihre Endapparate ändern ihre Reizbarkeit für verschiedene Strahlungen, wenn man von der Fovea centralis nach dem Rande geht, und zwar in dem Sinne, dass die Erregbarkeitsunterschiede die eine Gattung von Endapparaten für verschiedenartige Strahlungen zeigt, sich mehr und mehr ausgleichen, und dass auch die Unterschiede der Erregbarkeit der drei Gattungen von Endapparaten für dieselbe Strahlenart immer kleiner werden. Diese letzteren Unterschiede, so müssen wir insbesondere annehmen, sind für die End-

1 Fick, Zur Theorie der Farbenblindheit. Arbeiten aus dem physiologischen Laboratorium der Würzburger Hochschule. IV. Lieferung. S. 213. Würzburg 1878. Sep.-Abdr. aus den Verhandlungen der phys.-med. Gesellschaft.

apparate der roth- und grünempfindenden Strahlen schon in der mittleren Zone vollständig verschwunden.

Die drei Erregbarkeitskurven für homogene Strahlen nach der Weise entworfen, wie sie in Fig. 55 für die Polarzone gezeichnet sind, würden demnach für die mittlere Zone etwa die Gestalt der drei Curven *R G B* Fig. 55 zeigen. Die Curven *R* und *G* fallen eigentlich genau zusammen und es ist nur der Deutlichkeit wegen eine

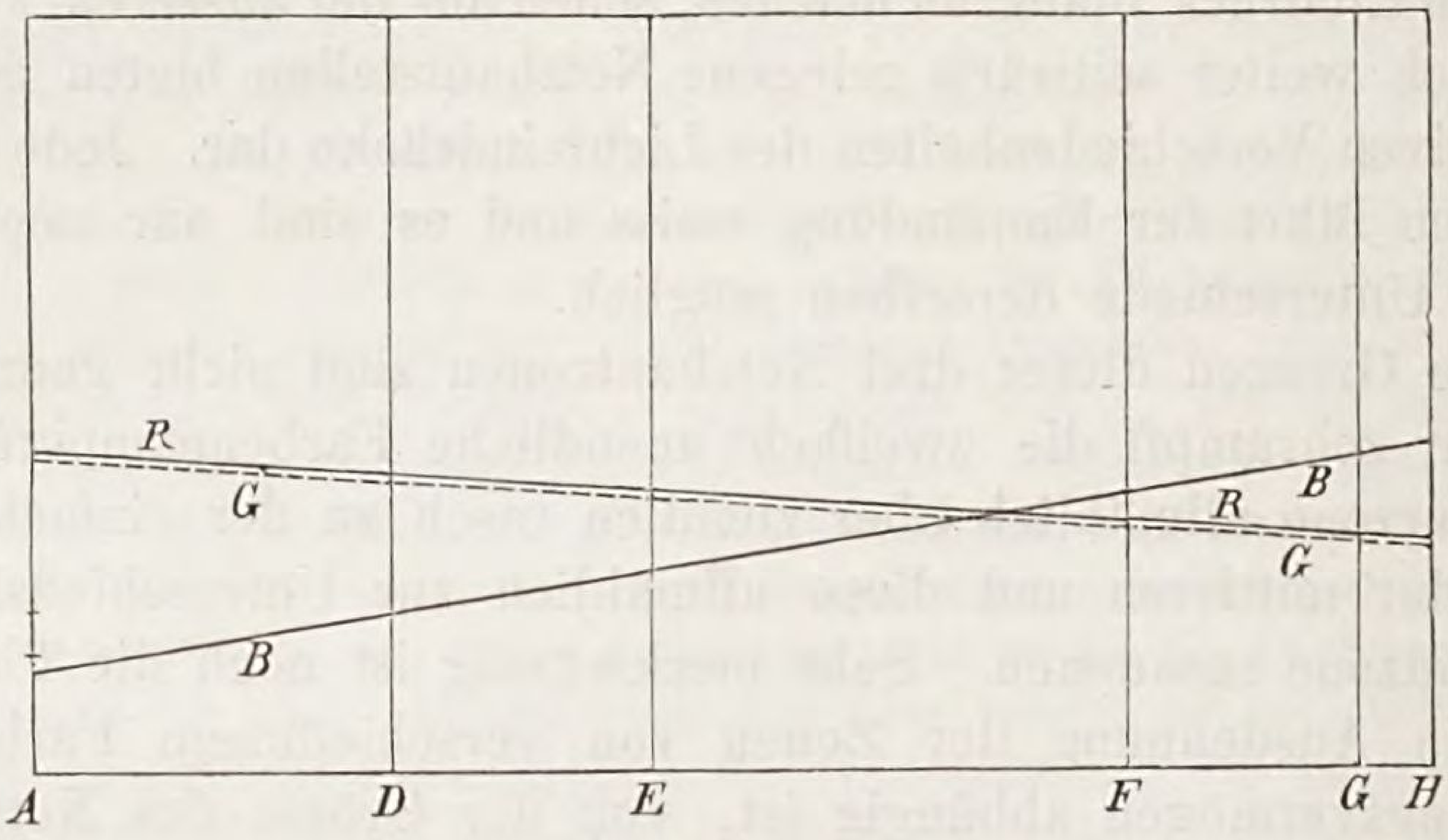


Fig. 55.

punktirte Linie neben eine ausgezogene gezeichnet. Für die Randzone fallen alle drei Curven in eine zur Abscissenaxe parallele Gerade zusammen. Es wird gut sein hier noch einmal ausdrücklich hervorzuheben, dass bei Construktion der Curven immer die verschiedenen Strahlungen auf solche Intensitäten gebracht zu denken sind, dass der totale physiologische Eindruck gleiche Intensität hat. Die objektive Energie muss also bei den wenigst brechbaren und bei den stärkst brechbaren Strahlungen sehr viel grösser gedacht werden, als bei den Strahlungen von mittlerer Brechbarkeit.

Es ist bemerkenswerth, dass die Reizbarkeit durch Licht überhaupt keineswegs auf den Seitentheilen der Netzhaut geringer ist als im gelben Fleck, wie man vielleicht nach den sonstigen Unvollkommenheiten der Seitentheile vermuthen könnte. Sie scheinen bezüglich der Reizbarkeit dem gelben Fleck eher überlegen zu sein. Es ist dies schon früher öfter behauptet worden und kürzlich durch exakte Versuche von Schadow[1] über allen Zweifel erhoben. Er fand, dass 30° seitwärts von der Fixationsrichtung ein Objekt bei geringerer Lichtstärke sichtbar ist als in derselben. Ein 60° seitwärts davon gelegenes Objekt muss allerdings stärker leuchten um wahrnehmbar zu sein als wenn es in der Fixationsrichtung liegt. Es wäre indessen denkbar, dass selbst auf dieser weit aussen gelegenen Zone die Reizbarkeit der Netzhaut noch ebenso gross oder grösser als im gelben Fleck ist und dass die Unsichtbarkeit gleich stark

1 Schadow, Arch. f. d. ges. Physiol. XIX. S. 499.

leuchtender Objekte die ihre Bilder dahin werfen nur daher rührt, dass diese Bilder selbst schwächer beleuchtet sind, weil die zu ihren Punkten gehenden Strahlenbündel wegen des schrägen Durchganges durch die Pupille weniger Oeffnung haben.

Bei einem namhaften Bruchtheil aller Menschen (wohl mehr als $^1/_{20}$), ist auch die Polarzone der Netzhaut nicht im Besitze der oben als normal geschilderten Mannigfaltigkeit von Farbenempfindungen. Man nennt solche Individuen farbenblind. Die Mannigfaltigkeit ihrer Farbenempfindungen ist mehr oder weniger gross. Es ist wahrscheinlich, dass dieser Zustand einfach darin besteht, dass die Beschaffenheit der Netzhaut, welche beim normalen Auge erst auf einer gewissen mittleren Zone beginnt, beim farbenblinden Auge schon in der Fovea centralis stattfindet. Der Grad der Farbenblindheit würde dann um so höher zu nennen sein, einer je weiter auswärts gelegenen Zone der Netzhaut des normalen Auges die Fovea centralis des Farbenblinden in ihrer Beschaffenheit entspricht. Die totale Farbenblindheit würde darin bestehen, dass die ganze Netzhaut die Beschaffenheit der äussersten Randzone des normalen Auges besitzt.

Es scheint eine partielle abnorme Farbenblindheit zu geben, welche sich von der der mittleren Zone des normalen Auges der Art nach unterscheidet. Dies wäre wohl so zu erklären, dass ein anderes Paar von Erregbarkeitskurven der drei Fasergattungen kongruent würde, als das Paar für die grün- und rothempfindenden Fasern, was dann zu einem andern System von Farbenempfindungen führen würde. Da indessen dieser ganze Gegenstand mehr der Pathologie als der Physiologie des Auges angehört, so kann hier nicht in das Detail der verwickelten und zum Theil noch nicht ganz aufgeklärten Erscheinungen eingegangen werden.

Die Anhänger der Young'schen Farbenempfindungstheorie haben früher die abnorme sowohl als die normale Farbenblindheit der äusseren Netzhauttheile auf andere Weise zu erklären versucht. Sie nahmen an, dass da wo sich das Farbensystem auf eine einfach unendliche Mannigfaltigkeit zurückzieht eine Fasergattung z. B. die der rothempfindenden fehle. Ein Netzhauttheil aber, welcher bloss blau- und grünempfindende Fasern besitzt, wäre der Empfindung Weiss gar nicht fähig. Wo es sich nun um ein fremdes pathologisch farbenblindes Auge handelt, kann natürlich die Frage nicht entschieden werden, ob dasselbe die Empfindung weiss hat, denn es würde sie nach dieser Auffassungsweise gar nicht kennen. Bei der Farbenblindheit der mittleren Zone des normalen Auges ist diese Ausflucht nicht möglich, da es die Empfindung weiss von der Polarzone seiner Netzhaut her genau kennt. Noch schlagender wird aber diese Auffassung dadurch widerlegt, dass die Strahlungen, welche auf der Polarzone den Eindruck Grün machen, auf der mittleren Zone den des Gelb hervorbringen, während doch hier gerade die Erregung der Grün em-

pfindenden Fasern ganz ungestört durch die Erregung von Roth empfindenden hervortreten müsste, die betreffende Strahlung müsste also entschieden noch grüner aussehen als auf Netzhautstellen die mit rothempfindenden Faserenden versehen sind.

Man könnte allesfalls diese Einwände zu entkräften suchen mit der Behauptung, dass man nicht berechtigt wäre, den qualitativen Charakter der Farbenempfindungen auf weit entlegenen Netzhautstellen so ohne weiteres zu vergleichen. Ich will daher noch eine andere Betrachtung wenigstens andeuten, aus welcher wie mir scheint mit grosser Wahrscheinlichkeit hervorgeht, dass die Annahme des Fehlens einer oder zweier Fasergattungen die Reduktion der Fasermannigfaltigkeit auf den äusseren Zonen der Netzhaut niemals erklären kann. Wie schon oben bemerkt, ist der Uebergang von der zweifach unendlichen Mannigfaltigkeit auf der Polarzone zur einfach unendlichen auf der mittleren ein allmählicher. Man müsste also annehmen, dass die Erregbarkeit der rothempfindenden Fasern von Zone zu Zone abnimmt bis sie zuletzt Null wird resp. die rothempfindenden Fasern fehlen. Diese Abnahme der Erregbarkeit der rothempfindenden Fasern müsste aber offenbar für die wenigst brechbaren Strahlenarten am raschesten geschehen, da sich der Farbeneindruck derselben am schnellsten ändert wenn man von der Polarzone zu den Seitentheilen der Netzhaut übergeht. Wenn man sich für alle diese Zonen die drei Erregbarkeitskurven der drei Fasergattungen konstruirt, so würde es wahrscheinlich eine Zone geben, wo die Erregbarkeitskurve der rothempfindenden Fasern nahezu ähnlich unter der der grünempfindenden hinzöge. Für diese Zone würde sich dann aber die Farbenfläche reduciren auf eine Strecke eines Striches der von *B* Fig. 49 nach einem Punkte zu ziehen wäre, welcher die Seite *RG* im Verhältniss der Ordinaten der Erregbarkeitskurven *R* und *G* theilte, wo also die Mannigfaltigkeit der Farben eine einfach unendliche wäre ähnlich der oben (S. 207) beschriebenen. Dann aber bei weiterer Abnahme der Erregbarkeit in den rothempfindenden Fasern würde wieder eine doppelt unendliche Mannigfaltigkeit von Farbenempfindungen auftreten entsprechend einem Flächenstück gelegen in dem Dreieck oberhalb des vorerwähnten Striches. Dies würde der Fall sein auf solchen Zonen der Netzhaut, wo die Erregbarbeit der rothempfindenden Fasern zwar noch kleiner geworden wäre, aber die Ordinaten der Kurve nicht mehr proportional den Ordinaten der für die grünempfindenden Fasern geltenden Kurve. Zuletzt würde sich natürlich die ganze Farbenfläche auf die Linie *BG* der Figur zurückziehen. Es müsste also zwischen zwei Netzhautzonen mit einfach unendlicher Farbenmannigfaltigkeit eine solche mit zweifach unendlicher eingeschlossen liegen, wovon durchaus nichts wahrzunehmen ist.

Die mangelhafte Fähigkeit der seitlichen Netzhauttheile Farben zu unterscheiden ist in neuerer Zeit von zahlreichen Forschern [1] zum Gegenstande der Untersuchung gemacht wordn, deren Ergebnisse zum Theil der vorstehenden Darstellung eingefügt sind.

1 Schelske, Arch. f. Ophthalmologie IX. S. 3; Schön, Die Lehre vom Gesichtsfelde und seinen Anomalieen. Berlin 1874; Klug, Ueber Farbenempfindung bei indirektem Sehen. Arch. f. Ophthalmologie XXI. S. 1; Holmgren, De la cécité des couleurs etc. Stockholm.

FÜNFTES CAPITEL.

Zeitlicher Verlauf der Netzhauterregung.

I. An- und Abklingen der Erregung. Reizung durch weisses Licht.

Da die Trägheit eine allgemeine Eigenschaft der Materie ist, so wird bei jeder Nervenreizung eine gewisse Zeit verstreichen von dem Augenblicke, wo der Reiz einzuwirken anfängt, bis zu dem, wo die Nervenmoleküle die Bewegungsgrösse erlangt haben, welche als merklicher Erregungsgrad bezeichnet werden kann. Ebensowenig können die Nervenmoleküle einmal in Bewegung gesetzt, momentan wieder zur Ruhe kommen, wenn der Reiz aufhört. Jede Erregung muss eine gewisse, wenn auch noch so kurze, Zeit den Reiz überdauern. Diese theoretisch vorauszusetzenden Thatsachen sind indessen keineswegs bei allen Arten der Nervenreizung experimentell erwiesen. So z. B. hat man bei der elektrischen Reizung motorischer Nerven bis jetzt kein „Stadium der latenten Reizung“ nachweisen können, während es bei der elektrischen Muskelreizung $^1/_{100}$ Sekunde beträgt. Dies rührt offenbar daher, dass die einer merklichen Nervenerregung entsprechende Bewegungsenergie ausserordentlich gering ist, so dass nur eine für unsere Beobachtungsmittel verschwindend kleine Zeit dazu gehört, sie den Nervenmolekülen durch den verhältnissmässig starken elektrischen Anstoss mitzutheilen. Dass andererseits eine Nachdauer der Erregung im motorischen Nerven nicht erweisbar ist, hat darin seinen Grund, dass das Reagens auf die Erregung nämlich die Muskelzuckung schon in ihrer einfachsten Gestalt eine ziemlich lange Zeit dauert, in welcher eine etwaige Nachdauer der Erregung des Nerven verschwinden würde. Benutzt man als Reagens auf den Erregungszustand die elektrische Stromschwankung, so könnte man allesfalls von einem Nachweis einer solchen Nachdauer sprechen, so fern in der That auf einen momentanen Reiz an jedem Punkte des Nerven ein Bewegungsvorgang statt hat, der eine merkliche Zeit dauert.

Die Trägheit der Sinnesnervenenden erscheint sehr verschieden. Die Tastnervenenden stehen in der Promptheit, womit sie auf ihren adäquaten Reiz den Druck reagiren und nach Aufhören desselben in den Ruhezustand zurückkehren oben an, denn es können gegen 1000 Einzelreize in einer Sekunde zwar nicht gezählt aber unter-

schieden werden. Auch die Gehörnervenenden vermögen vielleicht an 100 mal in einer Sekunde zwischen dem Zustande der Erregung und Ruhe zu wechseln, wie man bei der Wahrnehmung schwirrender Geräusche bemerken kann. Hinter den genannten Sinnen steht in dieser Beziehung der Gesichtssinn bedeutend zurück. Die verhältnissmässig träge Reaktion des Gesichtssinnes hat offenbar weniger ihren Sitz in den eigentlich nervösen Gebilden, als vielmehr in jenen Anhangsgebilden, wo, wie weiter oben gezeigt wurde, durch äusserst geringfügige Anstösse ein chemischer Process anhebt, der selbständig weiter geht und also erst allmählich zu voller Stärke entbrennt, dann aber auch nicht sofort erlischt, wenn die auslösende Ursache zu wirken aufgehört hat. Die letztere Thatsache des allmählichen „Abklingens“ der Lichtempfindung nach Aufhören des Reizes, das oft viele Sekunden dauert, ist schon von Alters her bekannt und vielfach genau beschrieben. Schliesst und verdeckt man nämlich die Augen, mit denen man irgend welches helle Objekt betrachtet hatte, plötzlich, so dauert die Erregung in den gereizt gewesenen Netzhautelementen noch an und man hat daselbst Lichtempfindungen, deren nach aussen projicirte scheinbare Ursache das „positive Nachbild“ des hellen Objektes genannt wird. Merkwürdigerweise ist dagegen die Trägheit der Netzhaut beim Entstehen der Erregung in der ersten Zeit nach dem Beginne des Reizes ganz unbeachtet geblieben. Soviel ich wenigstens sehe, bin ich selbst der erste gewesen, welcher die Aufmerksamkeit auf diese Erscheinung gelenkt hat.[1] Ich habe dafür die Bezeichnung „Anklingen“ der Erregung vorgeschlagen, die wie es scheint, auch von Anderen passend gefunden wird und daher hier gebraucht werden mag.

Die Thatsache des allmählichen Anklingens der Netzhauterregung und das Gesetz seines zeitlichen Verlaufes habe ich einfach deducirt aus der längst bekannten Erscheinung der rotirenden Scheibe mit weissen und schwarzen Sektoren. Das Gesetz für das Aussehen einer solchen ist in grösster Allgemeinheit schon weiter oben vorgreifend ausgesprochen. Es ist unter dem Namen des Talbot'schen Satzes bekannt und mag hier noch einmal mit besonderer Rücksicht auf den vorliegenden Zweck in etwas speciellerer Fassung ausgesprochen werden: Wenn eine Netzhaustelle in regelmässig periodischem Wechsel während einer gewissen Zeit a durch Strahlen von gewisser Intensität (die den Eindruck weiss machen mögen) getroffen wird und während einer gewissen Zeit b vollständig unbestrahlt bleibt und

1 A. Fick, Ueber den zeitlichen Verlauf der Erregung in der Netzhaut. Arch. f. Anat. u. Physiol. 1863.

wenn die Dauer $a + b$ der ganzen Periode weniger als etwa 0,04 Sekunden beträgt, so ist die Empfindung eine völlig stetige und von einer Stärke, wie sie einer andauernden Reizung des Retinastückes durch eine Strahlung von der Intensität $\frac{a}{a+b}$ entspricht. Ausdrücklich hervorzuheben ist noch die schon implicite im vorstehenden Satze enthaltene Behauptung, dass die Intensität der gleichmässig erscheinenden Empfindung vollständig unabhängig ist von dem absoluten Werthe der Periodendauer, wofern diese nur eben kurz genug ist, um eine konstante Empfindung zu geben. Eine solche periodische Bestrahlung einer Netzhautstelle kann man am leichtesten verwirklichen durch eine kreisförmige Scheibe, die in zwei oder $2n$ Sektoren getheilt ist, von denen die einen weiss die anderen schwarz sind und die man um eine zu ihrer Ebene im Mittelpunkt senkrecht stehende Axe so rasch dreht, dass der Vorübergang eines weissen und des nachfolgenden schwarzen Sektors zusammen nur etwa $^1/_{25}$ Sekunde dauert. Die Bedingung, dass die Netzhautstellen in periodischer Wiederholung eine Zeit lang unbestrahlt bleiben, ist allerdings nur annäherungsweise erfüllt, da eine noch so sorgfältig geschwärzte Papier- oder Sammetoberfläche immer noch Strahlen aussendet, indessen lassen sich doch an solchen gedrehten Scheiben die vorstehenden Sätze mit ausreichender Genauigkeit anschaulich machen. Vor Allem kann der Satz dass die Intensität des Lichteindruckes von der absoluten Dauer der Periode ganz unabhängig ist sehr schön demonstrirt werden, wenn man die gedrehte Scheibe so bemalt wie es in Fig. 56 angegeben ist.[1] Dreht man sie z. B. 25 mal in der Sekunde um, so dauert die Periode in welcher Bestrahlung und Beschattung wechseln für die innerste Zone gerade $^1/_{25}''$, für die mittlere Zone $^1/_{50}''$, für die Randzone $^1/_{100}''$, in allen drei Zonen aber dauert die Bestrahlung gerade die Hälfte der Periode und dem entspricht die genau gleiche scheinbare Helligkeit der drei Zonen. Um den Satz über die Grösse der Helligkeit genau numerisch zu bestätigen, bedarf es allerdings einer kleinen Modifikation der gedachten Scheibe, es müssen nämlich statt der schwarzen Sek-

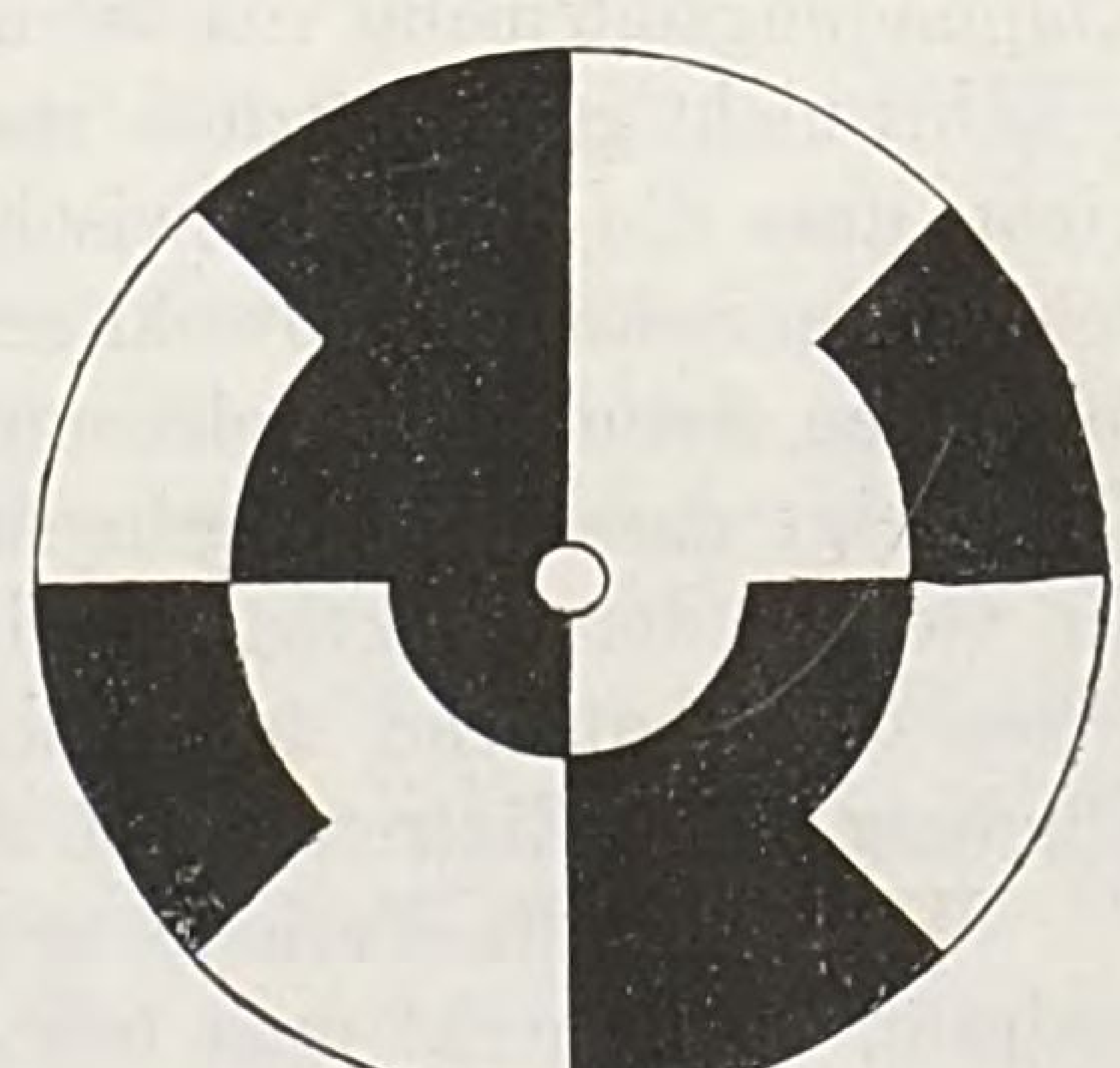


Fig. 56.

1 Siehe Helmholtz, Physiol. Optik S. 339.

toren Ausschnitte gemacht werden, durch welche man auf einen durch Beschattung absolut lichtlos gemachten Hintergrund sieht.

Wir wollen nun den Vorgang in einem Netzhautpunkte analysiren, welcher statthat, wenn er in stetiger Aufeinanderfolge und Wiederholung die Bilder der Punkte eines Kreises der Sektorenscheibe aufnimmt.[1] Wir tragen zu dem Ende in der Abscissenaxe *Od* Fig. 57 die Zeiten auf und errichten Ordinaten, welche die Intensität der Empfindung in dem durch den Fusspunkt dargestellten Augenblicke messen. Wäre der empfindende Apparat der Netzhaut ohne alle Trägheit, so würde sich die Kurve der Empfindungsintensitäten ausnehmen wie die geknickte Linie *Omnabopcd* u. s. w., wofern man durch die Strecke *Om* die Intensität der Lichtintensität misst, welche bei dauernder Einwirkung der vom weissen Sektor ausgesandten Strahlung stattfindet und wofern durch die Abscissenlänge *Oa* die Dauer des Vorüberganges eines weissen, durch *ab* die Dauer des Vorüberganges eines schwarzen Sektors dargestellt wird. Es würde die Empfindung zwischen den Werthen *Om* und Null fortwährend plötzlich schwanken. Sowie nun aber die Scheibe einigermaassen schnell gedreht wird, also die durch *Ob* dargestellte

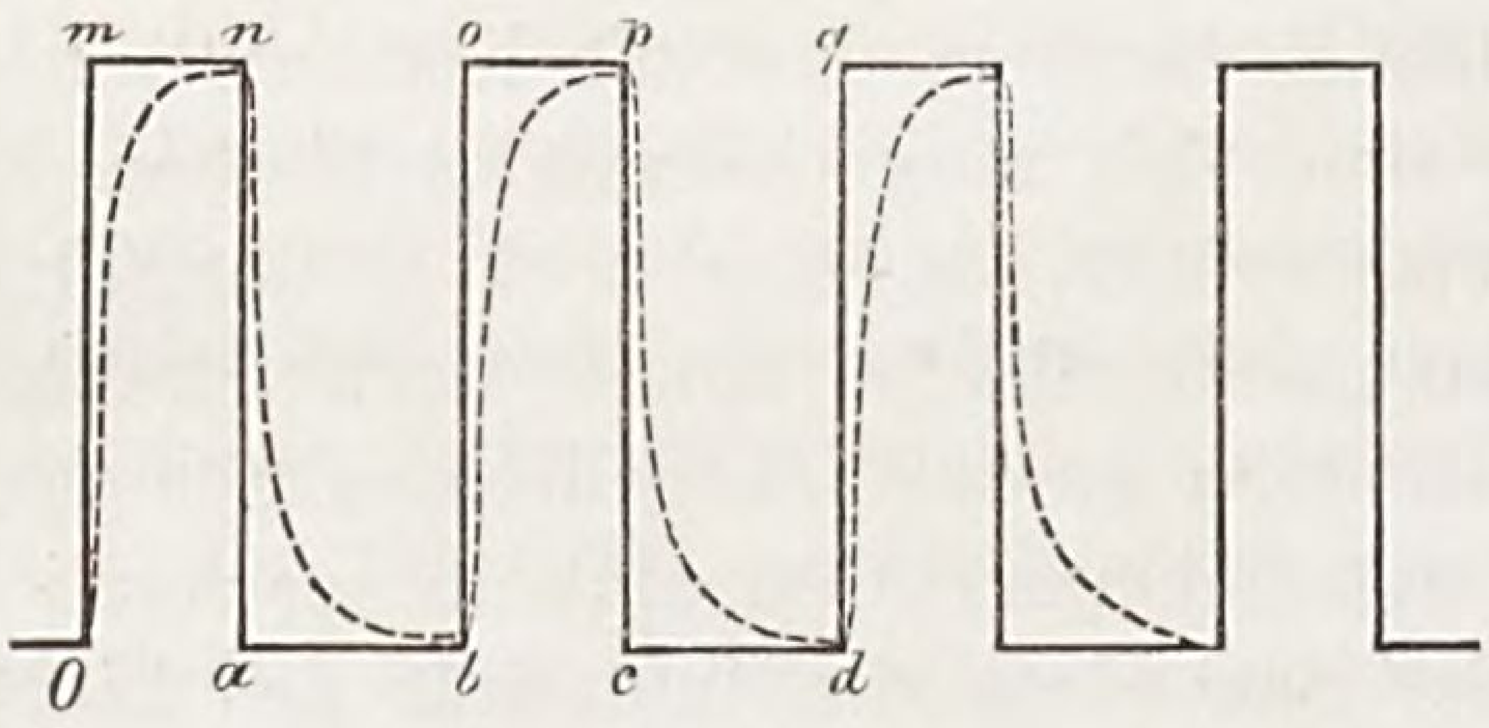


Fig. 57.

Zeit einigermaassen kurz ist, so bemerkt man, dass der Uebergang der Empfindungsintensität von ihrem Maximum zu ihrem Minimum und umgekehrt nicht ganz plötzlich stattfindet, was sich dadurch zu erkennen giebt, dass die Grenzen zwischen den vorübergehenden weissen und schwarzen Sektoren, sowohl auf der vorangehenden als auf der nachfolgenden Seite nicht vollkommen scharf, sondern verwaschen sind. Dies zeigt dass die Erregungskurve des einzelnen Netzhautelementes die Gestalt der punktirt gezeichneten Wellenkurven besitzt, womit schon die Thatsache des Anklingens und Abklingens der Lichtempfindung beim Eintreten und Aufhören des Reizes erwiesen ist.

Wird nun die Periode noch kürzer (wird die Scheibe schneller gedreht, so bemerkt man leicht, dass der volle Werth der Lichtempfindung (= *Om*) und der Werth Null gar nicht mehr zu Stande kommen, sondern nur ein Auf- und Abwogen der Empfindung zwi-

1 Siehe A. FICK, a. a. O.

schen engeren Grenzen stattfindet. Dies ist auch auf Grund der schon gewonnenen Thatsache vorauszusehen, denn wenn der helle Sektor schon vorüber ist, ehe der volle Werth *Om* erreicht ist, so kommt er überhaupt gar nicht zu Stande, sondern die Empfindungsstärke sinkt herab von einem geringen Werthe und wenn alsdann der schwarze Sektor vorüber ist, ehe die Empfindung auf Null gesunken ist, so kommt auch dieser Werth nicht mehr zu Stande, sondern die Empfindung steigt in Folge der neuen Bestrahlung von einem endlichen Minimalwerthe wieder an. Offenbar wird alsdann die Empfindung durch den zweiten weissen Sektor höher hinauf getrieben werden als durch den ersten, weil sie eben mit einem höheren Anfangswerthe begonnen hat. Ebenso wird sie der zweite schwarze Sektor nicht so tief herabdrücken, als der erste schwarze, weil der Abfall mit einem höheren Werthe begann. So werden die Maxima und Minima sich von Periode zu Periode erhöhen, bis ein stationärer Zustand erreicht ist (und dies geschieht sehr bald) bei dem die Empfindung durch den nachfolgenden schwarzen Sektor um ebensoviel gemindert wird, als sie durch den vorhergehenden weissen Sektor vermehrt war. Der Vorgang wird sich also darstellen durch eine Curve wie die in Fig. 58 stark ausgezogene Zickzacklinie. Jede ganze Periode besteht aus einem kleineren und einem grösseren Zwischenraume zwischen je zwei Ordinaten, der erstere ist die Vorübergangszeit eines weissen, der letztere die eines schwarzen Sektors oder jener die Zeit des Reizes, dieser die Zeit der Reizlosigkeit. Das grau flimmernde Aussehen der mässig rasch gedrehten Scheibe entspricht ganz dieser Kurve.

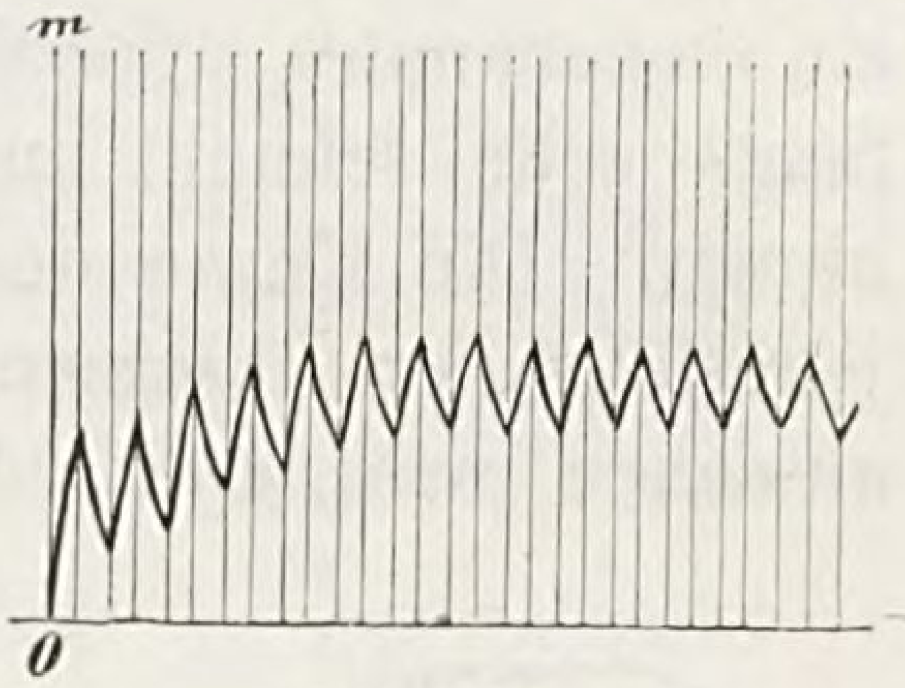


Fig. 58.

Selbstverständlich werden die Unterschiede zwischen den Maximis und Minimis des stationären Zustandes um so kleiner, je kleiner die Periode und ihre beiden Abschnitte werden, und es muss also bei einer gewissen Kleinheit der Periode dahin kommen, dass die Unterschiede unmerklich werden, d. h. dass die rotirende Scheibe gleichmässig grau aussieht und zwar tritt, wie schon bemerkt wurde dieses Unmerklichwerden der periodischen Helligkeitsänderung für mässige Tageshelle bei einer Dauer der Periode von etwa $^1/_{25}$ Sekunde ein.

Dass dies gleichmässige Grau nach übereinstimmenden Versuchen verschiedener Forscher ziemlich genau den *n*ten Theil der Helligkeit des weissen Sektors für sich zeigt, wenn sein Vorüber-

gang den nten Theil der ganzen Periode bildet, offenbart eine sehr bemerkenswerthe Beziehung zwischen den beiden Functionen der Zeit, von welchen die eine das Anwachsen der Empfindung nach Beginn des Reizes und die andere das Abnehmen der Empfindung nach Aufhören des Reizes darstellt. Es muss nämlich für jeden bestimmten Werth der ansteigenden und abnehmenden Empfindung der $1/n$ von der vollen Empfindungsstärke für dauernde Reizung beträgt, die Steilheit der Kurve des Abklingens zur Steilheit der Kurve des Anklingens sich verhalten wie $1/n : 1 - \frac{1}{n}$. Es muss also insbesondere z. B. auf der halben Höhe der vollen Empfindungsstärke die Steilheit des Anklingens und Abklingens gleich gross sein. Für grössere Werthe der Empfindungsstärke muss die Steilheit des Abklingens grösser sein und für kleinere Werthe die Steilheit des Anklingens.

Die allgemeine Form der Kurve des Abklingens einer Lichtempfindung ist leicht anzugeben. Wenn man nämlich nach kurzdauernder nicht ermüdender Betrachtung eines weissen Objektes das Auge schliesst und verdeckt, so sieht man im dunklen Gesichtsfelde ein sogenanntes „positives" Nachbild des weissen Objektes das anfangs sehr schnell und dann immer langsamer an Helligkeit abnimmt. Die Kurve des Abklingens der Lichtempfindung muss also jedesfalls der Abscissenaxe die Konvexität zuwenden und etwa so aussehen wie fgh in Fig. 59, wo in der Abscissenaxe die Zeiten gemessen werden und als Ordinaten die jeweilige Erregungsgrösse aufgetragen ist. In dem durch c dargestellten Augenblicke hört der Reiz auf zu wirken, welcher bis dahin die Erregung auf der durch die Ordinate $be = cf$ gemessenen Höhe erhalten hatte. Es sinkt dann in der folgenden Zeit cd die Erregungsstärke nahezu auf Null herunter, anfangs rapide und dann immer langsamer, wie es dem Verlaufe der Kurve fgh entspricht. Konstruirt man nach dieser allerdings willkürlichen Kurve gemäss der aus dem Talbot'schen Satze gezogenen Folgerung die Kurve des Anklingens, so zeigt sich dieselbe als eine annähernd gerade Linie. Wenn also eine Strahlung, welche bei dauernder Einwirkung die Erregungsstärke be hervorbringt im Augenblicke a anfinge und im Augenblicke c aufhörte zu wirken, so würde sich der zeitliche Verlauf der Erregung etwa nach Maassgabe der

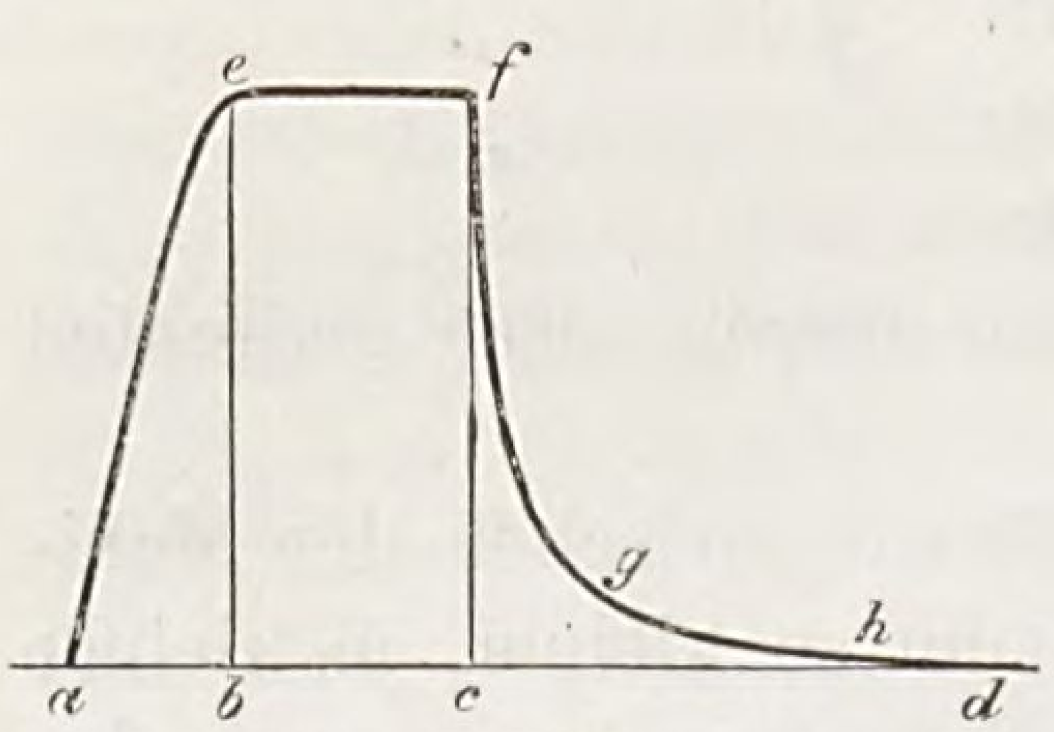


Fig. 59.

Kurve *aefgh* gestalten, d. h. sie würde während der ersten kurzen Zeit *ab* von Null bis *be* ansteigen, während der Zeit *bc* (von der Ermüdung abgesehen, annähernd) konstant bleiben und dann, wie vorhin schon beschrieben wurde, absinken.

Einfacher und schärfer lassen sich diese Entwickelungen in der Kunstsprache der mathematischen Analysis aussprechen.

Setzen wir eine bestimmte Reizstärke voraus, dann kann die Erregungsstärke x einmal als Funktion der Zeit t von dem Augenblick an wo der Reiz anhebt dargestellt werden und zweitens als Funktion der Zeit von dem Augenblick an, wo der Reiz aufhört, die erstere Funktion sei $x = F(t)$ die zweite sei $x = f(t)$. Wir bilden nun die Differentialquotienten

$$\frac{d\,F(t)}{d\,t} \text{ und } \frac{d\,f(t)}{d\,t},$$

welche gleichfalls zwei Funktionen von t sein werden. Denkt man jetzt die beiden Gleichungen $x = F(t)$ und $x = f(t)$ gelöst nach t und den ersten Werth von t in die Funktion $\frac{d\,F(t)}{d\,t}$ den zweiten in die Funktion $\frac{d\,f(t)}{d\,t}$ substituirt dann hat man zwei Funktionen von x die mit $\varphi\,(x)$ und $\chi\,(x)$ bezeichnet werden mögen.

Der Werth von $\varphi\,(x)$ für einen bestimmten Werth von x stellt dann die Steilheit dar, mit welcher während der Wirkung des Reizes beim Anklingen die Erregung von dem bestimmten erreichten Werthe x aus weiter wächst; und der Werth von $\chi\,(x)$ für einen bestimmten Werth bedeutet die Steilheit mit welcher während einer Pause des Reizes die Erregung von dem erlangten bestimmten Werthe x weiter sinkt. Nun sei τ der sehr kleine Werth der Periode und während der Zeit $\frac{m}{m+n}\tau$ dauert die Bestrahlung während der Zeit $\frac{n}{m+n}\tau$ die Nichtbestrahlung. Zeit der Bestrahlung und Pause verhalten sich also wie $m:n$. Dann ist die Bedingung dafür, dass beim Erregungswerthe x der Erregungszustand stationär bleibt die Gleichung

$$x + \frac{m}{m+n}\tau \,.\, \varphi\,(x) + \frac{n}{m+n}\,\tau \,.\, \chi\,(x) = x \text{ oder}$$
$$m\,\varphi(x) + n\,\chi(x) = o$$

denn nur wenn diese Gleichung erfüllt ist, nimmt der Erregungswerth x während der Bestrahlungszeit $\frac{m}{m+n}\tau$ um dieselbe unmerkbar kleine Grösse zu, um welche er in der nachfolgenden Zeit $\frac{n}{m+n}\tau$ der Nichtbestrahlung wieder abnimmt. Diese Gleichung lässt erstens sehen, dass die Funktionen $\varphi\,(x)$ und $\chi\,(x)$ nothwendig entgegengesetzte Vorzeichen haben müssen, was sich übrigens ohnehin von selbst versteht. Andererseits lässt sie erkennen, dass der Werth von x, bei welchem nach dieser Gleichung der stationäre Zustand eintritt, unabhängig ist von der Perioden-

dauer τ und nur abhängt vom Verhältniss $\frac{m}{n}$ wie auch immer die Funktionen $\varphi(x)$ und $\chi(x)$ beschaffen sind.

Um unsere Gleichung mit dem Talbot'schen Satze in Beziehung zu setzen, bemerken wir, dass derselbe aussagt: der Werth von x, für welchen der stationäre Zustand eintritt, ist derselbe Bruchtheil der vollen Erregungsstärke bei dauernder Einwirkung der Strahlung wie der Zeitraum $\frac{m}{m+n}\tau$ von der ganzen Periode. Wir können indessen unbeschadet der Allgemeinheit den vollen Betrag der Erregungsstärke $= 1$ setzen und haben dann

$$x = \frac{m}{m+n} \text{ oder } \frac{m}{n} = \frac{x}{1-x}.$$

Durch Einsetzen dieses Werthes geht die obige Gleichung über in

$$x\,\varphi(x) + (1 - x)\,\chi(x) = 0$$

durch welche jene oben schon ausgesprochene merkwürdige Beziehung zwischen den Funktionen des An- und Abklingens der Erregung festgestellt ist. Nehmen wir an die Funktion des Anklingens wäre wirklich, wie wahrscheinlich gemacht wurde, einfach $F(t) = ct$, dann wäre $\varphi(x) = c$ (Constant) und die Gleichung lautete dann

$$c\,x + (1 - x)\,\chi(x) = 0 \text{ oder } \chi(x) = -c\,\frac{x}{1-x}$$

da aber

$$\chi(x) = \frac{d\,f(t)}{dt}$$

so hätte man

$$\frac{d\,f(t)}{dt} = -c\,\frac{x}{1-x} \text{ oder } \frac{dx}{dt} = -c\,\frac{x}{1-x}$$

oder endlich

$$-\frac{1}{c}\left(\frac{1}{x} - 1\right) dx = dt$$

Das Integral dieser Gleichung ist

$$\frac{1}{c}\left(x - \log x\right) = t + \text{Const}$$

Die Constante bestimmt sich durch die Bedingung, dass zu Anfang der Zeit die volle Erregung 1 statthat, also für $t = 0$ $x = 1$ sein soll $\text{Const} = \frac{1}{c}$. Daher hat man schliesslich

$$t = \frac{1}{c}\left(x - \log x - 1\right)$$

worin die Definition der Funktion des Abklingens unter der Voraussetzung eines linearen Anklingens gegeben ist, freilich ist die Gleichung nicht nach x lösbar, so dass man $x = f(t)$ nicht algebraisch herstellen kann. Man könnte aber eine beliebig grosse Zahl von zusammengehörigen Werthen von x und t numerisch berechnen.

Nachdem in der dargestellten Weise die Thatsache des Anklingens der Lichtempfindung aus der längst bekannten Erscheinung der gedrehten Sektorenscheibe deducirt war, habe ich dieselbe auch

direkt gezeigt durch Versuche nach folgendem Plane: ein weisses Objekt wurde während einer sehr kurzen Zeit dem Auge dargeboten und hierauf sogleich graue Flächen von verschiedener Helligkeit. Dann war zu beurtheilen welchem dieser letzteren das nur kurze Zeit betrachtete weisse an Helligkeit scheinbar gleich war. Es zeigte sich nun schon bei diesen mit sehr unvollkommenen Hilfsmitteln angestellten Versuchen, was nach der Deduktion zu erwarten war. Je kürzer die Zeit war während deren das weisse Objekt wirkte, desto dunkler war das Grau, welchem es gleich erschien.

Später hat S. Exner [1] den experimentellen Beweis für die Thatsache des Anklingens der Lichtempfindung auf dem von mir mit höchst unvollkommenen Hilfsmitteln betretenen Wege noch einmal geführt, mit Hülfe eines sehr sinnreichen von Helmholtz erfundenen Apparates, der es gestattet zwei weisse Objekte nebeneinander während sehr kurzer Zeiten erscheinen zu lassen und zwar so, dass die objektiven Helligkeiten sowohl als die kleinen Zeiten, während welcher die beiden Objekte sichtbar sind, in jedes beliebige numerisch angebbare Verhältniss zu einander gesetzt werden können. Es zeigt sich dabei, dass ein an sich weniger helles Objekt durch längere Dauer seiner Wirkung eine ebenso intensive Lichtempfindung hervorrufen kann, wie ein helleres Objekt bei kürzerer Dauer. Der Apparat gestattet quantitative Resultate zu gewinnen, insbesondere lässt sich die Zeit bestimmen, innerhalb deren eine Lichtempfindung zu ihrer vollen Intensität anwächst. Diese Zeit ist wie zu erwarten war um so kleiner, je grösser die Intensität des Reizes oder die Helligkeit des Objektes an sich ist, und zwar nimmt sie sehr annähernd in arithmetischer Progression ab, wenn man die Helligkeit in geometrischer Progression wachsen lässt. Selbstverständlich kann dieser Satz nur bis zu einem gewissen sehr mässigen Grade der Helligkeit Geltung haben, da ja sonst bei sehr hohen Graden der Helligkeit ein negativer Werth der Zeit sich ergeben würde, was unmöglich ist. Nachstehende Tabelle giebt die numerischen Data für zwei Versuchsreihen von Exner.

Ein Lichtreiz vom Intensitätsgrade	bringt die volle Stärke der Empfindung hervor in	Differenzen der Zeit.
1	0,2873″	
2	0,2460	0,0413
4	0,2000	0,0466
8	0,1508	0,0492

[1] S. Exner, Ueber die zu einer Gesichtswahrnehmung nöthige Zeit. Sitzgsber. d. Wiener Acad. 1868. October.

Ein Lichtreiz vom Intensitätsgrade	bringt die volle Stärke der Empfindung hervor in	Differenzen der Zeit.
1	0,2654	0,0478
2	0,2176	0,0432
4	0,1744	0,0556
8	0,1188	

Unter Anwendung gewisser durchaus zulässiger Hülfsannahmen lässt sich nach der in Rede stehenden Methode für einen bestimmten Helligkeitswerth die Abhängigkeit der jeweiligen Intensität der im Entstehen begriffenen Lichtempfindung von der Zeit, die seit Beginn des Reizes verstrichen ist, ziemlich genau bestimmen. Als Beispiel einer solchen Bestimmung giebt Exner folgende Tabelle:

Die Lichtempfindung erreicht von ihrer vollen Stärke	nach einer Einwirkung des Reizes von
1/10	0,008″
2/10	0,023
3/10	0,037
4/10	0,040
5/10	0,049
6/10	0,058
7/10	0,081
8/10	0,104
9/10	0,127
10/10	0,166

Stellt man diese Tabelle graphisch dar, indem man die Zeiten als Abscissen die erreichten Intensitäten als Ordinaten aufträgt, so erhält man bis zu der Ordinate, welche 8/10 der vollen Intensität entspricht sehr annähernd eine gerade Linie, was ich schon durch Zergliederung des Talbot'schen Satzes wahrscheinlich gemacht hatte.

II. An- und Abklingen der Erregung bei Reizung mit farbigem Licht.

Das Anklingen der Erregung nach Beginn des Lichtreizes ist vom Standpunkte der Young'schen Theorie in jeder Fasergattung ein Vorgang für sich und es ist im Sinne dieser Theorie keineswegs zu erwarten, dass die drei gleichzeitigen Vorgänge genau gleichen Schritt halten. Wäre der Gang des Anklingens in den roth-, grün- und blauempfindenden Fasern sehr verschieden, so müsste ein weisses Objekt in den ersten Momenten nach seinem Auftauchen im Gesichts-

felde gefärbt erscheinen. Davon nimmt man nun bei den Versuchen weder nach meiner noch nach der HELMHOLTZ'schen Methode etwas Entschiedenes wahr, woraus hervorgeht, dass der zeitliche Verlauf des Anklingens der Erregung bei Reizung mit weiss aussehender Strahlung in den verschiedenen Fasergattungen annähernd derselbe ist. Dahingegen zeigen sich sehr eigenthümliche Erscheinungen, wenn man farbig aussehende Strahlungen sehr kurze Zeit hindurch einwirken lässt.

Die ersten hierher gehörigen Angaben finden sich in dem oben citirten Aufsatze.[1] Ich hatte mit meinen unvollkommenen Apparaten schon bemerkt, dass bei sehr kurzer Einwirkung farbige Objekte anders gefärbt erscheinen als bei dauernder Betrachtung. Später hat auf meine Veranlassung KUNKEL[2] diesen Gegenstand genauer untersucht mit Hilfe des von EXNER angewandten Apparates und homogener Strahlungen. Er fand, dass das Spektrum überaus kurze Zeit betrachtet, ganz farblos und am rothen Ende verkürzt erscheint. Dauert die Einwirkung etwas länger, so scheint es aus einem rothen und blauen Theil zu bestehen und zwar erscheinen die bei dauernder Betrachtung grünen, blauen und violetten Theile nunmehr alle blau. Auf annähernd gleiche physiologische Intensität gebracht, bringen die rothen Strahlen am schnellsten die volle Erregungsstärke zu Wege, weniger schnell die blauen und am wenigsten schnell die grünen. Es wäre natürlich leicht diese Thatsachen auf dem Standpunkte der YOUNG'schen Theorie in ebenso viele Lehrsätze über die Erregungsweise der drei Fasergattungen durch Strahlen von verschiedener Schwingungszahl zu übersetzen.

Ebenso wie das Anklingen der Erregung wird auch das Abklingen derselben in jeder der drei hypothetischen Fasergattungen ein besonderer von den anderen unabhängiger Vorgang sein, und wenn diese drei Vorgänge zeitlich nicht ganz gleichen Schritt halten, so muss das Nachbild eines weissen Objektes nach und nach verschiedene Färbungen zeigen. Dies ist nun in der That schon vor langer Zeit beobachtet und als farbiges Abklingen der Nachbilder von FECHNER, PLATEAU, SEGUIN und Anderen beschrieben. HELMHOLTZ beschreibt in Uebereinstimmung mit FECHNER und SEGUIN die Reihenfolge der Farben, wenn man ein hell weisses Objekt auf dunkelm Grunde momentan betrachtet hat und nun das Auge schliesst

1 A. FICK, Ueber den zeitlichen Verlauf der Netzhauterregung. Arch. f. Anat. u. Physiol. 1863. S. 764.

2 A. KUNKEL, Ueber die Abhängigkeit der Farbenempfindung von der Zeit. Arch. f. d. ges. Physiol. IX. S. 197.

und verdeckt so, dass das positive Nachbild rasch aus dem ursprünglichen weiss durch grünliches Blau in Indigoblau, später in Violett oder Rosa übergeht. Dann folge ein schmutziges Orange, welchem sich oft noch ein sehr schwaches schmutziges Gelbgrün anschliesse. Die ersten Phasen im Abklingen der Nachbilder sind auf dem Standpunkte der Young'schen Theorie leicht dahin zu deuten, dass die Erregung der rothempfindenden Elemente anfangs am schnellsten, später am langsamsten abklinge und die der grünempfindenden anfangs am langsamsten und später am schnellsten, während die blauempfindenden zu Anfang und später bezüglich der Geschwindigkeit des Abklingens in der Mitte stehen. Bei den noch späteren Phasen des Abklingens der Nachbilder scheinen Einflüsse der Ermüdung mit ins Spiel zu treten, von welcher im Folgenden die Rede sein wird.

Bei längerer Betrachtung des Urbildes spielen diese Einflüsse von vorn herein eine Rolle und es wird dadurch die Reihenfolge der Farben im abklingenden Nachbilde verschiedentlich modificirt.

III. Ermüdung der Netzhaut.

Da in den Endapparaten der Sehnerven der Reiz durch Bestrahlung einen chemischen Process auslöst, welcher den Bestand des Apparates irgendwie ändern muss, so wird jeder folgende Reizanstoss denselben vermuthlich in einem andern Zustand treffen und also auch einen andern Effekt hervorrufen als der erste. Ob der Effekt in dem durch den ersten Reiz veränderten Apparat grösser oder kleiner ausfallen wird, lässt sich a priori nicht entscheiden. An sich ist es ebensowohl denkbar, dass die Veränderung durch den ersten Reizanstoss die weitere Veränderlichkeit (Reizbarkeit) erhöht, als dass sie dieselbe herabsetzt. In der That bemerkt man bei wiederholter Reizung eines Muskels sehr oft, dass die Wirkung jeder folgenden Reizung (die Zuckung) grösser ist als die der vorhergehenden. Das ist allerdings von vornherein sicher, dass eine solche Steigerung der Reizbarkeit bei einem dem Blutkreislaufe entzogenen reizbaren Gewebsstücke nicht ins Unbegrenzte dauern kann, denn durch jeden Reiz wird etwas von dem Vorrathe des dem chemischen Processe unterworfenen Materiales verbraucht, so dass dieser Vorrath schliesslich erschöpft werden müsste. Bei einem mit dem lebenden Körper noch verbundenen reizbaren Gewebsstücke kann freilich dieser Vorrath beständig durch die Ernährung neu ergänzt werden und diese kann auch die Produkte des chemischen Processes schnell wegführen, so dass es an sich nicht ganz undenkbar wäre, dass dennoch jeder

folgende Reiz das reizbare Gebilde in demselben Zustande (also bei gleicher Reizbarkeit) anträfe wie der vorhergehende, wenn nämlich die Ernährung mit der durch den Reiz gesetzten Zerstörung genau gleichen Schritt hielt. Wirkt die Reizung aber sehr energisch und in rascher Aufeinanderfolge oder gar stetig andauernd, so ist kaum zu erwarten, dass die Ernährung mit ihrer zerstörenden Wirkung gleichen Schritt halten kann, wir sehen daher bei den reizbaren Gebilden regelmässig auch im lebenden Körper einer energischen Reizung Veränderung der Reizbarkeit folgen, welche wenigstens auf die Dauer ausnahmslos in einer Verminderung besteht. Diese allen reizbaren Gebilden eigene Erscheinung nennt man die Ermüdung. Sie tritt um so leichter und früher ein, je energischer die in dem Gebilde verlaufenden Processe sind. An den Nervenfasern ist daher von Ermüdung nur schwer etwas wahrzunehmen, während die Muskeln verhältnissmässig rasch ermüden. Uebrigens beruht die Ermüdung überall wie es scheint, weit mehr auf der Anhäufung der durch den chemischen Process der Erregung gesetzten Produkte als auf der Erschöpfung des Vorrathes von zersetzbarem Material.

Wenn die reizbaren Endapparate der Netzhaut in dem eben definirten Sinne ermüdbar sind, so muss sich dies darin zeigen, dass bei andauernder Bestrahlung einer Netzhautstelle die Intensität der Erregung und folglich der Empfindung mit der Zeit abnimmt. Eine helle Fläche müsste also bei andauernder Fixation allmählich immer weniger und weniger hell erscheinen. Beim gewöhnlichen Sehen wird davon der ungeschulte Beobachter nichts gewahr, doch ist daraus keineswegs zu schliessen, dass diese Erscheinung nicht vorhanden ist, denn einmal pflegen wir selten ein und dasselbe Objekt sehr lange anhaltend zu fixiren, andererseits ist die Intensität einer gegenwärtigen Empfindung überhaupt schon sehr schwer mit der einer vergangenen zu vergleichen, besonders wenn die eine aus der andern durch ganz stetige Veränderung entstanden ist. In der That findet die fragliche Erscheinung statt und wird einem geübten Beobachter bei langdauernder Fixation irgend eines hellen Objektes schwerlich entgehen. Man kann sie aber auch dem Ungeübtesten durch einen sehr einfachen Kunstgriff leicht sichtbar machen. Man lasse ihn ein weisses Papierstück auf möglichst dunkelm Grunde 10 — 20 Sekunden lang scharf fixiren und schiebe nun ein grosses Blatt von demselben weissen Papier über Grund und Objekt hin, dann wird dem Beobachter die Stelle desselben, welche dem vorher gesehenen hellen Papierstück entspricht, bedeutend dunkler erscheinen als die Umgebung. Von dem vorher gesehenen hellen Objekt

wird, wie man sich auszudrücken pflegt, in dem hernach in grösserer Ausdehnung erhellten Gesichtsfelde ein dunkles, negatives Nachbild erscheinen. Diese Erscheinung muss — wenn auch bei ihren Einzelheiten noch andere Umstände im Spiele sind — im Grossen und Ganzen auf die Ermüdung der Netzhaut bezogen werden. Die Netzhauttheile nämlich, welche anfangs das Bild des hellen Objektes aufnahmen, werden erregt und ermüdet, während die, welche dem schwarzen Grunde im Bild entsprechen, unerregt und unermüdet blieben. Trifft hernach beim Vorschieben der grossen weissen Papierfläche dieselbe Strahlung beiderlei Netzhauttheile, so entsteht in der unermüdeten eine stärkere Empfindung, während in den ermüdeten die schwächere Empfindung fortbesteht.

Bei exakten Versuchen der beschriebenen Art gewahrt man leicht, dass das negative Nachbild um so dunkeler ist, je länger das helle Urbild fixirt wurde, was sich leicht aus dem Fortschreiten der Ermüdung erklärt, die man von vornherein zu erwarten Veranlassung hat. Es zeigt sich ferner, dass schon nach wenigen Sekunden das Nachbild verhältnissmässig sehr dunkel ist, d. h. dass schon nach wenigen Sekunden dauernder Erregung die Erregbarkeit durch Ermüdung sehr bedeutend vermindert ist, dass also die Endapparate des Sehnerven in sehr hohem Grade ermüdbar sind. Bei seinen oben erwähnten Versuchen hat Exner beobachtet, dass sogar schon nach Bruchtheilen einer Sekunde von dem Augenblicke an gerechnet, wo die Empfindung ihr Maximum erreicht hat, eine Schwächung durch Ermüdung bemerkbar wird. Er führt das nachstehende numerische Beispiel an:

Intensität der Erregung	nach Wirkungsdauer der Strahlung von
$^9/_{10}$	0,359″
$^8/_{10}$	0,486″
$^7/_{10}$	0,659″

Die Intensität der Erregung ist gemessen in Bruchtheilen des Maximums, welches sie bei der angewandten Strahlungsintensität erreicht. Die Wirkungsdauer ist gemessen vom Augenblicke des ersten Aufblitzens der Strahlung. Von den Zahlen der zweiten Spalte müsste also noch die Dauer von 0,166″ Sekunden abgezogen werden wenn man die Zeit von dem Augenblicke an messen wollte, wo die Intensität der Erregung ihr Maximum erreicht hat, denn bis zur Erreichung desselben waren eben 0,166″ verstrichen. (Siehe S. 220.)

Der weitere Gang der Netzhautermüdung war schon vorher von C. F. Müller[1] untersucht. Er betrachtete ein weisses Papierstück vor schwarzem Grunde eine bestimmte Zeit hindurch und liess plötzlich ein graues Papier von photometrisch gemessener Helligkeit daneben halten. Durch Probiren wurde ein Stück von solcher Helligkeit herausgefunden, dass es dem anhaltend fixirten weissen Papier gleich erschien. Dabei hatte sich herausgestellt, dass durch die Ermüdung die Erregung anfangs am schnellsten und dann immer langsamer abnimmt. Das während der ganzen Nacht ausgeruhte Auge ermüdet in den ersten 5 Sekunden viel mehr als das während des Tages allemal nur bis zum vollständigen Verschwinden aller Nachbilder geruhte. Nach den von Müller graphisch dargestellten Versuchsreihen lässt sich aus dem Gang der Ermüdung bei Abendversuchen ungefähr beurtheilen, wie viel das Auge durch den Gebrauch während des Tages an Erregbarkeit derart einbüsst, dass sich die Einbusse nur durch stundenlang dauernde Ruhe wieder ersetzen lässt. Es wird hiernach ein und dasselbe Objekt dem Auge beim ersten Blicke etwas über doppelt so hell erscheinen als am Abend dem nur flüchtig ausgeruhten Auge.

Bezüglich der Abhängigkeit der Ermüdung von der Stärke des Reizes hat Helmholtz[2] vermuthungsweise den Satz ausgesprochen, dass ihr relativer Werth unabhängig sei von der Reizstärke mit anderen Worten: die Einwirkung eines Reizes während einer bestimmten Zeit reducire gleichen Zustand des Auges vorausgesetzt die gesehene Helligkeit stets um denselben Bruchtheil ihres ursprünglichen Werthes wie gross oder wie klein auch die Reizstärke sei. Hauptsächlich um diesen Satz zu prüfen, hat auf meine Veranlassung C. F. Müller die soeben citirte Untersuchung unternommen und seine Versuche haben ergeben, dass der Satz jedesfalls innerhalb sehr weiter Grenzen der Reizstärke sehr annähernd gültig ist.

Ist das Urbild gefärbt und das hernach auf das ganze Gesichtsfeld einfallende Licht, welches Helmholtz das reagirende Licht nennt, gefärbt oder weiss, so treten am negativen Nachbilde eine Menge von mannigfaltigen Erscheinungen auf. Vom Standpunkte der Young'schen Theorie lassen sich dieselben alle zum Voraus ableiten und es ist daher für die Darstellung derselben ohne Zweifel eine grosse Erleichterung, sich auf den Standpunkt dieser Theorie zu stellen, wenn

1 C. F. Müller, Versuche über den Verlauf der Netzhautermüdung. Züricher Inauguralabhandlung 1866.
2 Helmholtz, Physiologische Optik S. 362.

man sie auch nicht für den endgültigen Ausdruck des wahren Sachverhaltes gelten lassen will.

Im Sinne der Young'schen Theorie wird man anzunehmen haben, dass wie die Erregung so auch die Ermüdung in jeder der drei hypothetischen Fasergattungen ein selbständiger von den beiden Anderen unabhängiger Vorgang ist. Es ist ferner die wahrscheinlichste Annahme, dass der absolute Ermüdungsgrad einer Fasergattung der Intensität der vorausgegangenen Erregung proportional ist. Aus diesen beiden Annahmen lassen sich die Erscheinungen der negativen Nachbilder farbiger Objekte bis ins feinste Detail ableiten. Führen wir dies zunächst an einem bestimmten Beispiel durch. Das Urbild sei ein grellrothes Flächenstück auf schwarzem Grunde d. h. ein Flächenstück, welches eine Strahlung aussendet, die vorwiegend die rothempfindenden Fasern erregt. Diese werden also auch vorwiegend ermüdet. Bedecken wir nun Objekt und Grund mit einer weissen Fläche, so werden alle Retinaelemente von einer Strahlung getroffen, welche im unermüdeten Element alle drei Fassergattungen gleich stark erregt. Die den Grund bedeckenden Theile der Fläche werden demnach wirklich weiss erscheinen. In den Netzhautelementen aber, in welchen durch das Urbild die rothempfindenden Fasern stärker als die beiden andern ermüdet sind, werden die blau- und grünempfindenden durch das weisse Licht stärker afficirt und es wird also auf der weissen Fläche ein blaugrünes Nachbild des rothen Urbildes erscheinen. Selbstverständlich hebt sich das blaugrüne Nachbild dunkel von dem weissen Grunde ab, da ja in seinem Bereiche auf der Netzhaut als einer ermüdeten die Gesammterregung geringer ist als in der vollständig unermüdeten Umgebung.

Schiebt man statt der weissen eine gelb aussehende Fläche vor das rothe Urbild und seinen schwarzen Grund, so erscheint darauf ein grünes Nachbild vom rothen Urbild. In der That erregt ja jetzt das reagirende Licht vorzugsweise die roth- und grün empfindenden Fasern wenig die blauempfindenden. Nun sind aber die rothempfindenden Fasern sehr ermüdet. Es muss also an den betreffenden Netzhautstellen die Rothempfindung zurücktreten und die Grünempfindung allein in sehr entschiedenes Uebergewicht kommen.

Die ganze Lehre von der Färbung negativer Nachbilder farbiger Objekte kann man in folgende Sätze zusammenfassen, die man als Folgerungen aus der Young'schen Theorie oder als Ausdruck der beobachteten Thatsachen ansehen kann. Sei A der Farbenton der Lichtempfindung, welchen die vom Urbilde ausgesandte Strahlung hervorbringt und B der, welcher dem reagirenden Lichte entspricht.

Der Farbenton des Nachbildes wird dann vom Farbenton *B* derart abweichen, dass er dem zu *A* komplementären Farbenton *C* ähnlicher wird. In diesem zwischen *B* und *C* liegenden Farbenton wird aber das Nachbild blasser (mehr grau) als das reagirende Licht erscheinen, wenn der Farbenton *B* dem *A* näher liegt als dem *C* und gesättigter wenn *B* dem *C* näher liegt als dem *A*. Interessant ist noch der specielle Fall, wo der Farbenton *B* des reagirenden Lichtes genau mit dem Farbenton *C* der zur Farbe des Urbildes komplementär ist übereinstimmt. In diesem Falle wird das Nachbild genau im Farbenton des reagirenden Lichtes erscheinen, aber noch gesättigter aussehen als dieses selbst. Diese Thatsache lässt sich wie HELMHOLTZ gezeigt hat selbst an Spektralfarben beobachten. Lässt man z. B. auf eine kleine Retinastelle blaugrünes Licht längere Zeit einwirken und hierauf nach Beseitigung desselben auf eine grössere Retinafläche, welche die erstere einschliesst, rothes homogenes Licht aus dem Spektrum, so erscheint in dem grösseren rothen Felde ein Nachbild des vorher blaugrünen Fleckes von so gesättigter Röthe, dass dagegen das Roth der Umgebung, wo die unermüdeten Netzhautelemente von dem homogenen rothen Lichte getroffen werden, blass erscheint. In dieser Thatsache liegt der Beweis des bemerkenswerthen Satzes, dass die Farbenempfindungen, welche durch homogene Strahlungen auf unermüdeten Netzhautstellen hervorgebracht werden, noch lange nicht die gesättigtsten sind, deren der Sehapparat überhaupt fähig ist. Diese kommen erst dann zu Stande, wenn homogene Strahlungen auf Netzhautstellen wirken, die zuvor durch die komplementäre Strahlung ermüdet sind. Im Sinne der YOUNG'schen Theorie entspricht dieser Satz der oben gemachten Annahme, dass jede homogene Strahlung im ermüdeten Netzhautelement j e d e der drei Fasergattungen erregt wenn auch v o r z u g s w e i s e ein oder zwei derselben.

SECHSTES CAPITEL.

Erregung der Netzhaut durch andere Ursachen als Lichtstrahlung.

I. Mechanische und elektrische Reizung der Netzhaut.

Die Einstrahlung von Aetheroscillationen auf die Netzhaut ist keineswegs die einzige Einwirkung, welche ihre Elemente in denjenigen Bewegungszustand versetzen kann, welchem eine Lichtempfindung entspricht. Vor Allem ist es eine längst bekannte Thatsache, dass die Netzhautelemente sehr leicht von aussen mechanisch und elektrisch gereizt werden können. Jeder heftige Stoss auf das Auge füllt das ganze Gesichtsfeld mit einem intensiven Lichtblitze. Genauer kann man die Wirkung mechanischen Druckes erkennen, wenn man ihn in mässigem Grade auf einen beschränkten Theil des Augapfels wirken lässt der mit nervösen Netzhautelementen versehen ist, der also hinter dem Aequator liegt. Man verfährt am einfachsten so, dass man das Auge nach innen wendet und nun am äusseren Winkel mit dem Fingernagel oder einem abgestumpften Holzstifte gegen den Augapfel drückt. Man sieht alsdann bei geschlossenem Auge im dunkelen Gesichtsfelde eine lichte Scheibe mit dunklem Rande der noch einmal von einem hellen umsäumt ist. Der Ort dieses „Druckbildes“ oder „Phosphens“ liegt natürlich nasenwärts im Gesichtsfelde, da die Reizung eines schläfenwärts von der Axe gelegenen Netzhautpunktes selbstverständlich auf ein nasenwärts gelegenes äusseres Objekt bezogen wird. Drückt man oben, so erscheint das Phosphen unten im Gesichtsfelde und umgekehrt. Macht man den beschriebenen Versuch bei offenem Auge, so zeichnet sich das Phosphen im Ganzen dunkel im hellen Gesichtsfelde. Daraus ist zu schliessen, dass der Druck die von ihm getroffenen Netzhautelemente nicht nur reizt, sondern auch ihre Reizbarkeit für Strahlung herabsetzt.

Von den zahlreichen Erscheinungen, welche auf mechanische Erregung der Netzhautelemente zu beziehen sind, mag nur noch eine von Purkinje und Czermak unter dem Namen des Akkommodationsphosphens beschriebene erwähnt werden. Diese beiden Beobachter geben an, dass am äusseren Rande ihres Gesichtsfeldes, das durch Abhaltung äusseres Lichtes verdunkelt ist, eine lichte in sich ge-

schlossene Ringlinie aufblitzt, wenn sie von grösster Anstrengung des Akkommodationsapparates plötzlich zur Ruhe desselben übergehen. Czermak meint, dass diese Erscheinung zu erklären sei durch die Zerrung, welche die an der ora serrata gelegenen Netzhautelemente von der beim Nachlassen des tensor chorioideae sich plötzlich anspannenden Zonula Zinnii erleiden.

Bei der bekannten grossen elektrischen Reizbarkeit aller Nervenfasern ist es nicht überraschend auch die Opticusfasern elektrisch reizbar zu finden. In der That sieht man das ganze Gesichtsfeld hell aufblitzen wenn man einen elektrischen Strom, der Zweige durch das Auge sendet schliesst oder öffnet. Der Strom darf hierbei sogar äusserst schwach sein. Während der Dauer eines konstanten das Auge durchfliessenden Stromes zeigen sich auch noch einige Lichterscheinungen, die jedoch wohl nicht alle auf eine eigentliche Reizung der Nervenelemente des Auges durch den konstanten Strom zu beziehen sind, obwohl eine solche an sich nicht unwahrscheinlich ist, da andere sensibele Nerven auch durch den konstanten Strom in dauernder Erregung gehalten werden.

Wenn ein schwacher elektrischer Strom bei geschlossenem Auge aufsteigend durch den nervus opticus geleitet wird, so erscheint während seiner Dauer das dunkle Sehfeld heller und mehr blass violett. Die Eintrittstelle des Sehnerven soll dabei in den ersten Augenblicken als eine dunkle Kreisscheibe erscheinen. Geht unter gleichen Umständen der Strom absteigend durch den Sehnerven, so wird das Gesichtsfeld noch dunkler und röthlichgelb, wobei sich auch wieder die Eintrittsstelle des Sehnerven auszeichnen soll und zwar als hellere bläuliche Scheibe.

II. Eigenlicht der Retina.

Die Theile des Sehnervenapparates sind nun wie viele andere Nervenapparate z. B. die Gefässnerven die Hemmungsfasern des Vagus und so weiter auch dann meist nicht in vollständiger Ruhe, wenn keinerlei äussere reizende Einwirkung stattfindet. Man nennt bekanntlich eine derartige fortwährende Erregung in einem Nervengebiete, die durch innere Ursachen bewirkt wird, eine tonische. Da aber jede Erregung des Sehnervenapparates als Lichtempfindung zum Bewusstsein kommt, so wird hier die tonische Erregung die Folge haben, dass das Sehfeld auch bei vollständigem Abschluss des Auges gegen Einstrahlung und andere äussere Reize nicht absolut dunkel ist. Diese Lichterscheinungen ohne äusseren Reiz nennt man das „Eigen-

licht der Retina". Es ist im Allgemeinen nicht konstant, sondern besteht in allerlei bewegten, theils farbigen theils farblosen Flecken die Gestalt und Farbe beständig ändern. Die tonische Erregung des Sehapparates ist also in seinen verschiedenen Elementen offenbar in beständigem Auf- und Abwogen begriffen, was bei andern tonisch erregten Nervenapparaten wohl auch der Fall sein wird.

Was die reizenden Ursachen sind, welche die tonische Erregung hier zu Stande bringen, ist nicht mit Sicherheit zu sagen, doch dürfte wohl am meisten die Vermuthung für sich haben, dass es chemische Einwirkungen des Blutes auf nervöse Elemente sind, die wir ja auch im Gefässnervencentrum ziemlich sicher als eine von den Ursachen der tonischen Erregung ansprechen können. Diese Vermuthung würde noch die andere nach sich ziehen, dass die Stellen wo die Reize des Blutes einwirken nicht in den nur spärlich versorgten Nervenfasern zu suchen wären, sondern in den reichlicher damit gespeisten zelligen Elementen sei es an den peripherischen Enden in der Netzhaut oder an den centralen Enden im Hirn. Die Verstärkung des Eigenlichtes der Retina während eines den Opticus aufsteigend durchfliessenden Stromes und die Schwächung derselben während eines absteigenden scheint dafür zu sprechen, dass die Reizstelle im Centrum zu suchen sei, denn diese Stellen sind bei aufsteigendem Strome im Katelektrotonus bei absteigendem im Anelektrotonus und werden also in jenem Falle mehr, in diesem weniger erregbar sein. AUBERT[1] schätzt auf Grund gewisser Versuche und Annahmen die Helligkeit des Eigenlichtes seiner Netzhaut gleich der Hälfte der Helligkeit, in welcher ein von der Venus in grösstem Glanze beschienenes Blatt weisses Papieres erscheinen wird. Jedesfalls ist übrigens die Intensität des Eigenlichtes der Retina eine sehr veränderliche Grösse.

III. Einwirkung der Netzhautelemente aufeinander. Contrast.

Höchst merkwürdig ist noch eine Gruppe von Lichterscheinungen, welche unter dem Namen des Contrastes zusammengefasst werden. Sie sind auch nicht hervorgebracht durch äussere Einwirkung auf die Netzhautelemente, in welchen sie zu Stande kommen, sondern durch die Einwirkungen von Seiten benachbarter Netzhautelemente, durch welche in jenen Erregung oder Modifikationen der Erregbarkeit bewirkt werden.

Die Grunderscheinung des Kontrastes ist von Alters her bekannt

1 AUBERT, Handb. d. ges. Augenheilkunde II. 2. Hälfte. S. 486.

und besteht darin, dass jedes Helle in dunkler Umgebung heller, in noch hellerer Umgebung dunkler erscheint. Es giebt besonders zwei Versuche, in denen man diese Erscheinung sehr rein und schön zur Anschauung bringen kann. Man nehme eine Scheibe die wie Fig. 60 mit weissen und schwarzen Sektoren bemalt ist. Wird dieselbe mit der erforderlichen Geschwindigkeit um eine in ihrem Mittelpunkt zu ihr senkrecht stehende Axe gedreht, so sollte sie nach den früher entwickelten Sätzen in vier Zonen zerfallen, deren jede vollständig gleich hell erscheinen müsste und zwar die innerste ganz schwarz jede folgende nach aussen heller als die vorhergehende. Dies ist nun aber keineswegs der Anblick den die gedrehte Scheibe bietet, vielmehr erscheint jede Zone an ihrem inneren Rande, wo sie an die dunklere Zone grenzt heller, am äusseren Rande dunkler und dazwischen aufs zarteste abschattirt. Vielleicht noch sauberer und beweisender ist der Versuch, wenn man vor einer weissen Fläche eine Reihe von etwa vier Kerzen aufstellt und nun dazwischen bis gegen die Mitte der Reihe einen undurchsichtigen Schirm mit senkrechter gerader Kante vorschiebt. Dann wird ein Theil der weissen Fläche von allen vier Kerzen beleuchtet sein, dann folgt ein senkrechter Streif, der nur von dreien, dann einer der nur von zweien beleuchtet ist u. s. w. bis zu dem Theil der Fläche, welcher von keiner Kerze Licht erhält. Jeder dieser Streifen ist in seiner ganzen Breite gleich stark beleuchtet und doch erscheint er auf der Seite, wo er an den dunkleren grenzt heller, auf der andern dunkler und dazwischen zart abschattirt. Keine Erklärung liegt wohl für diese Erscheinungen näher als die, dass eben eine starke Erregung einer Netzhautstelle die Erregbarkeit in den übrigen herabsetzt und zwar um so mehr, je näher sie ihnen liegt. Diese Annahme ist auch schon längst stillschweigend gemacht oder ausgesprochen. Sie ist aber in neuerer Zeit von Helmholtz ganz in den Hintergrund gedrängt worden, der diese und viele ähnliche Erscheinungen lediglich auf eine Täuschung in der Beurtheilung der Helligkeit bezogen wissen wollte, etwa wie man einen mittelgrossen Mann neben einem kleinen für gross, neben einem grossen für klein hält. Nur vereinzelte Stimmen haben sich immer wieder jener näher liegenden Erklärung zugewandt, aber vor

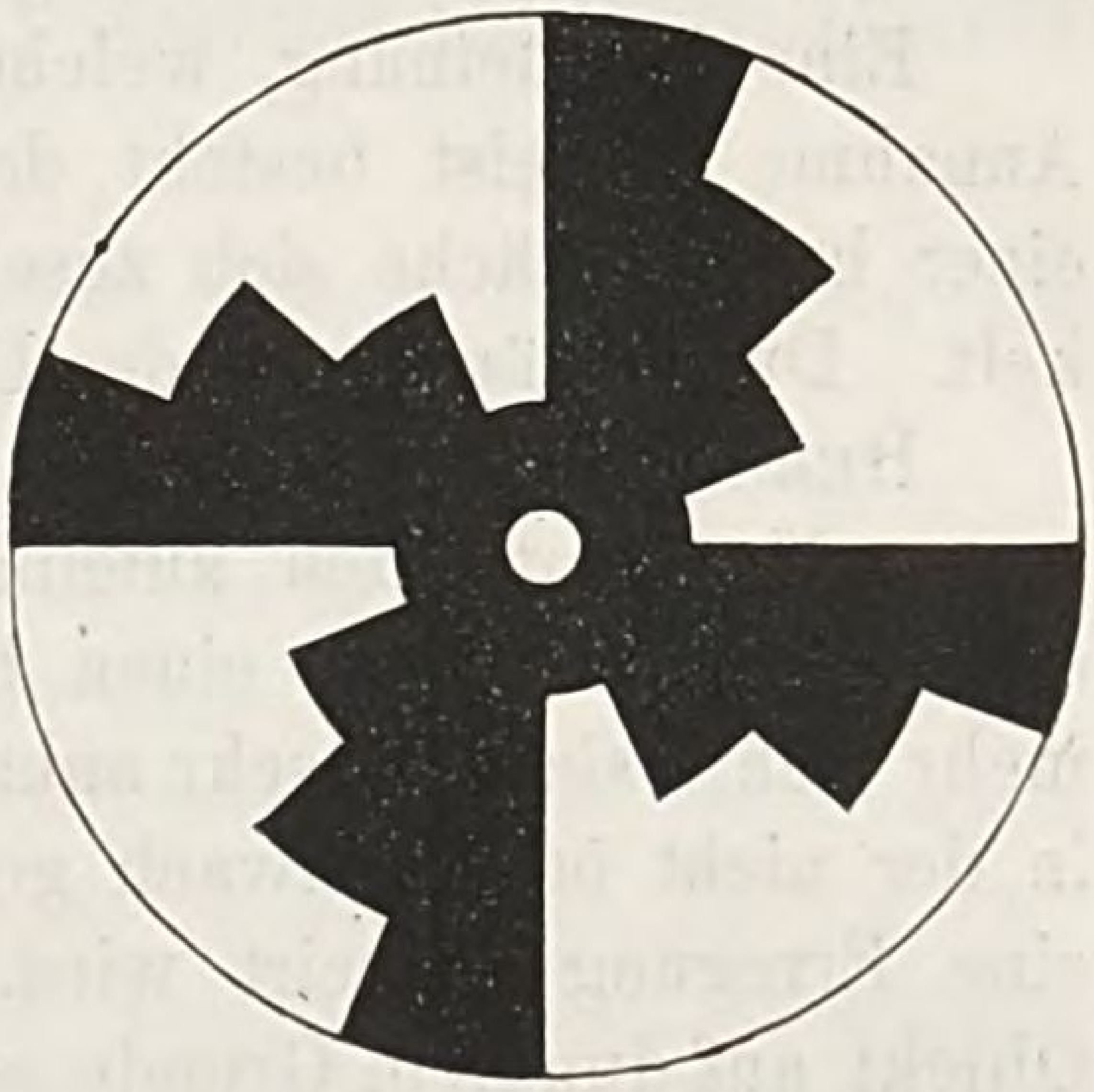


Fig. 60.

einigen Jahren ist es wie mir scheint Hering [1]) gelungen, durch scharfsinnige Zergliederung der Thatsachen und neue Modifikationen der Versuche unwiderleglich festzustellen, dass die Contrasterscheinungen wesentlich auf einer Aenderung der Erregbarkeit der einen Netzhautstelle durch Reizung der benachbarten beruhen.

Eine Erscheinung, welche sehr schlagend die in Rede stehende Annahme beweist besteht darin, dass ein negatives Nachbild auf einer hellen Fläche sich zusehends mehrere Sekunden lang verdunkelt. Durch Täuschung des Urtheils kann dies nicht erklärt werden.

Hering hat aber ferner gezeigt, dass die Einwirkung benachbarter Netzhautstellen aufeinander nicht lediglich in Herabsetzung der Erregbarkeit der einen bei Reizung der andern besteht. Vielmehr kehrt sich bei sehr anhaltender Reizung der Erfolg um, so dass in der nicht oder schwach gereizten die Erregbarkeit zunimmt resp. eine Erregung inducirt wird. In der That, fixirt man ein helles Objekt auf dunklem Grunde sehr andauernd, so tritt nur in der ersten Zeit die vorhin beschriebene Contrasterscheinung hervor, dass nämlich der dunkle Grund in der Nähe des hellen Objektes noch dunkler erscheint. Allmählich verbreitet sich um das helle Objekt ein lichter Schimmer, der namentlich bei plötzlicher Schliessung der Augen im nunmehr ganz verdunkelten Gesichtsfelde als sehr heller Saum, um das tief dunkle Nachbild des hellen Objektes aufleuchtet. Hering hat diesen Versuch noch mannigfach modificirt und eine ganze Reihe von Erscheinungen beschrieben, die sich entschieden nicht durch Urtheilstäuschungen erklären lassen.

Wendet man bei den Contrastversuchen statt weisses Lichtes farbiges an, so treten auch in den beeinflussten Netzhautstellen Farbenerscheinungen auf, die im Sinne der Young'schen Theorie etwa dahin zusammengefasst werden können, dass die Erregbarkeit derjenigen Fasergattung der nicht gereizten Elemente am meisten vermindert und in der späteren Phase am meisten erhöht wird, welche in den benachbarten gereizten Elementen am meisten erregt ist.

Die Annahme, dass benachbarte Netzhautelemente aufeinander wirken können, dürfte eine anatomische Grundlage finden in der wenigstens von manchen Autoren behaupteten Verknüpfung der zelligen Elemente der Netzhaut. Die Gesetze dieser gegenseitigen Einwirkung benachbarter Netzhautelemente bedürfen aber zweifellos noch weiterer Untersuchung.

1 Hering, Zur Lehre vom Lichtsinne. Sitzgsber. d. Wiener Acad. Juni 1872. December 1873.

ANHANG.

Einige unerklärte subjektive Lichterscheinungen.

Unter verschiedenen Umständen macht sich im Gesichtsfelde die dem gelben Fleck der Netzhaut entsprechende Stelle besonders bemerklich. Für jeden leicht wahrnehmbar ist eine solche Erscheinung bei intermittirender Beleuchtung. Wenn man z. B. die mässig gespreizten Finger einer Hand vor einem gleichmässig hellen Hintergrunde rasch hin- und herbewegt, so bedeckt sich das Gesichtsfeld mit flimmernden dunkeln Flecken und die dem gelben Flecke entsprechende Stelle zeichnet sich aus durch regelmässige Anordnung dieser Fleckchen, ganz in der Mitte erscheint ein genauer Kreis mit auffallend hellem Saume.

Der Kreis, welcher der Mitte des gelben Fleckes entspricht, erscheint manchen Beobachtern auch zuweilen in gleichmässiger konstanter Beleuchtung namentlich wenn dieselbe blau ist. Er soll dann von einem dunklen Hofe umgeben sein entsprechend der gefässlosen Zone des gelben Fleckes. Um den dunkeln Hof zeigt sich ein unbestimmt begrenzter genau kreisförmiger oder rhombischer heller Ring von Helmholtz [1] als Loewi'scher Ring bezeichnet.

Sieht man nach einer gleichmässig hellen Fläche durch eine polarisirende Vorrichtung z. B. durch ein Nicol'sches Prisma so erscheinen auf dem gelben Fleck die sogenannten Haidinger'schen Büschel. In weisser Beleuchtung zeichnen sich nämlich heller als der Grund und bläulich gefärbt zwei hyperbolisch jedoch verwaschen begrenzte Flecke aus. Die reelle Axe der Hyperbel, deren Mittelpunkt der fixirte Punkt ist, liegt senkrecht zur Polarisationsebene, so dass sich bei Drehung des Nicols vor dem Auge die ganze Erscheinung dreht. Um die Linie herum, in welcher die Polarisationsebene die Netzhaut schneidet, erscheint das Gesichtsfeld etwas dunkler und (in weisser Beleuchtung) gelblich gefärbt. Die ganze Erscheinung umspannt einen Gesichtswinkel von etwa 4°.

Da das Licht des hellen Himmels theilweise polarisirt ist, so nehmen manche Menschen die Büschel wahr, wenn sie nach dem blauen Himmel auch ohne polarisirende Vorrichtung sehen.

1 Helmholtz, Physiol. Optik S. 419.

Helmholtz [1] versucht die Erscheinung zu erklären durch die Annahme von Doppelbrechung in den Radialfasern des gelben Fleckes, welche hier etwas schräg von allen Seiten gegen die Mitte verlaufen.

Wenn man nach längerem Bücken den Kopf wieder erhebt und nach einer gleichmässig hellen Fläche sieht, so sieht man oft auf derselben zahlreiche kleine helle Ringelchen mit heller Mitte in verschlungenen Bahnen herumlaufen. Sie haben grosse Aehnlichkeit mit mikroskopisch gesehenen Blutkörperchen. Dies hat wohl manche Autoren veranlasst, sie für eine Erscheinung der Blutkörperchen in den Capillaren der Netzhaut zu halten. Die übrigen Umstände namentlich die Vereinzelung der Ringelchen und die Form ihrer Bahnen verbieten indessen eine solche Erklärung entschieden.

1 Helmholtz, Physiol. Optik S. 422.

DRITTER THEIL.

CHEMISCHE VORGÄNGE IN DER NETZHAUT

VON

PROF. DR. W. KÜHNE IN HEIDELBERG.

So lange man die Netzhaut kennt, weiss man wie ausserordentlich veränderlich sie ist: im Leben als höchst durchsichtiger Ueberzug dem Augengrunde glatt und spiegelnd angeschmiegt, wird sie im Tode schnell weisslich trübe, hebt sich faltig ab und zeigt ihre Elemente im Zerfalle begriffen. Die Untersuchung frischer unveränderter Thieraugen hat darum gewöhnlich mehr zur Erkenntniss der Netzhaut beigetragen als die der selten brauchbaren vom Menschen, und erst als man wusste, worauf bei letzteren besonders zu achten und welche Eigenthümlichkeiten an der menschlichen Netzhaut vorauszusetzen seien, ist das in wenigen Ausnahmsfällen zugängliche, kostbare Material lebensfrischer, menschlicher Augen mit Vortheil verwendet worden. Da die Physiologie der Sinne sich aus guten Gründen mit Vorliebe an die menschlichen Sinnesorgane, deren Leistungen uns allein vollkommen bekannt werden können, wendet, ist unser lückenhaftes Wissen vom Baue und von der Zusammensetzung der menschlichen Netzhaut ausdrücklich hervorzuheben.

Die ersten cadaverösen Veränderungen der Retina bestehen in Trübungen der vorderen, aus marklosen Nerven und Ganglienzellen bestehenden Schichten, weniger der äusseren Körnerschicht, ferner in dem von MAX SCHULTZE besonders genau verfolgten Zerfalle der Stäbchen- und Zapfenaussenglieder zu Säulen dünner Plättchen, welches auch die Durchsichtigkeit dieser hinteren Schicht vermindert. Postmortale Lockerung der Stäbchenschicht vom retinalen Epithel findet nicht statt, sondern umgekehrt, trotz der Faltenbildung, eine festere Verbindung; ist die letztere im Momente des Todes schon vorhanden, so wird sie erst spät durch echte Fäulniss und Zerfliessen der betheiligten Gewebe gehoben. Das Auftreten eines Atlasglanzes

an der Stäbchenschicht, welches Boll [1] für die erste Leichenveränderung genommen, ist unabhängig von der Plättchensonderung, und lebensfrischen, durch Licht noch erregbaren Netzhäuten ebenfalls eigenthümlich: es rührt von Schrägstellung und Verschiebungen der glänzenden Stäbchen gegen einander her und ist durch Zug und Druck sowohl hervorzurufen, wie stellenweise zu beseitigen. Längere Zeit nach dem Auftreten der deutlicheren, von der Plättchensonderung bedingten Querstreifung in den Stäbchen beginnt die Lockerung der Aussenglieder von den Innengliedern, wobei sich die ersteren oft als zusammenhängendes Häutchen, welches dem Epithel anhaften kann, abheben. Später krümmen sich die Stäbchen hirtenstabförmig und gestalten sich zu vollkommenen Ringen um.

Alle diese Veränderungen deuten auf einen hohen Grad chemischer Zersetzlichkeit der Retinaelemente, denn dieselben sind nicht bedingt von der allgemeinen, auch resistentere Gewebe bedrohenden Bakterienfäulniss, die sich freilich in der Netzhaut früh und ausnahmslos intensiv geltend macht, sondern fallen in die Zeit, wo wir nur in den zarteren nervösen Gebilden ähnliche, mit dem Aufhören des Zusammenwirkens einiger Lebensbedingungen verbundene, chemische Zersetzungen eintreten sehen; bei den Säugern und den Vögeln stellen sie sich schnell ein, bei den Amphibien sehr langsam, erst nach vielen Stunden, wenn die Temperatur nicht über 15 ^{0} C. steigt und keine Flüssigkeiten zugesetzt werden. Einflüsse des Lichtes auf den Ablauf dieser Vorgänge sind nicht bekannt.

Da die ersten postmortalen Aenderungen an Geweben im Allgemeinen vom Aufhören der Blut- und Saftspeisung und von dem Erlöschen der Gewebeathmung abgeleitet werden, so sollte man die Retina wegen der Geschwindigkeit ihrer Veränderungen im exstirpirten oder absterbenden Auge für besonders reichlich mit Blutgefässen versorgt halten. Bekanntlich trifft dies im anatomischen Sinne nicht zu, denn es giebt sogar bei einzelnen Säugethieren (Pferd, Kaninchen) Netzhäute, welche genau genommen gar kein Blut empfangen, da bei ihnen nur die erste Ausstrahlung des Opticus gefässhaltig ist, und es kommen überhaupt keine Netzhäute vor mit anderen als grobmaschigen Capillarnetzen, welche sich niemals weiter nach hinten, als bis an die äussere Körnerschicht erstrecken, so dass die Stäbchen-Zapfenschicht überall gefässlos bleibt. Um so wichtiger würde hiernach die Kenntniss anderer Saftbahnen der Netzhaut sein; doch weiss man von ihren Lymphgefässen bekanntlich kaum mehr, als dass sie vom Opticus her

1 Fr. Boll, Zur Anatomie und Physiologie der Netzhaut. Monatsber. d. Berliner Acad. 12. Nov. 1876.

durch Einstich theilweise injicirbar sind und ausser Netzen, Hohlräume um die Ganglienzellen der vorderen Schichten bilden.

Aus den rein anatomischen Verhältnissen der Gefässarmuth des Netzhautgewebes auf geringen Stoffverkehr ihrer Elemente mit der den übrigen Organismus versorgenden Speise bewegter Säfte und weiter auf einen entsprechend schwachen Stoffwandel oder auf besonders untergeordnete chemische Processe in der lebenden und sehenden Retina zu schliessen, würde eben so unberechtigt sein, wie wenn man die viel massigeren Läppchen einer Drüse, die im besten Falle nur äusserlich von Gefässen eng umsponnen werden, für chemisch träge Organe halten wollte. Eine mehr physiologische Betrachtung lehrt, dass die Netzhaut besonders mit dem ihr eigenthümlichen specifischen Sinnesepithel in ganz ungewöhnlicher Weise dem Blute zugänglich ist und von dem reichsten und engmaschigsten Capillarnetze versorgt wird, das wir überhaupt kennen. Gehört auch die Chorioidea dem Sinnesepithel weder anatomisch noch genetisch an, so kann der übermächtige Blutgehalt dieser Aderhaut doch kaum andern Sinn haben, als den die davor liegende Retina mit reichlichem Materiale zu versehen. Die Sclera und das Chorioidealgewebe bedürfen einer so ausserordentlichen Ernährung nicht und dass das erstaunlich entwickelte Gefässnetz überall im Augengrunde als transsudirende Einrichtung zur Erhaltung des intraocularen Druckes nöthig sei, ist kaum anzunehmen, wo die Vascularisation des Ciliarkörpers dazu genügt. Man kommt daher zu dem Schlusse, dass das Sehepithel vor jedem andern Epithelium und vor sämmtlichen Sinnesepithelien bevorzugt sei durch ein ihm äusserlich angelegtes, feinstes bluterfülltes Röhrenwerk, das fast eine continuirliche Schicht flach ausgebreiteten und bewegten Blutes darstellt. Von dieser muss transsudirendes Material in reichlichem Flusse zum Epithel der Netzhaut und zur Stäbchen-Zapfenschicht nach vorn dringen, während es dort an Wegen zur Abgabe des im Leben und beim Sehen Verbrauchten gewiss nicht gebricht.

Chemische Vorgänge in der Netzhaut von höchster Wichtigkeit, als wesentlich zum Sehen, ja als den Anfang des Sehactes anzunehmen, gab es seit langer Zeit zahlreiche Gründe. Die immer mehr sich befestigende Lehre von den specifischen Sinnesenergien schliesst jede Annahme einer der Bewegung des Lichtäthers auch nur entfernt entsprechenden Schwingungsweise in der davon erregten Retina oder in den zum Hirn leitenden Opticusfasern aus. Nirgends kann weniger als beim Auge an einen dem sog. adäquaten Reize ähnlichen Vor-

gang in der Sinnessubstanz gedacht werden, da es schlechthin unmöglich ist, dass der nervöse Apparat mit so vielen oder ähnlichen eigenen Schwingungen reagire, als ihm mit den nach Billionen in der Secunde zählenden Schwingungen des Lichtes zugehen. Die Aetherbewegung muss in der Netzhaut umgewandelt werden, entweder in moleculare Bewegung, indem die Sehzellen erwärmt werden, oder zu chemischen Processen[1], deren die verschiedensten denkbar sind, verbraucht werden, in beiden Fällen unter Absorption von Licht. Ohne Zweifel ist die Mehrzahl der Physiologen seit langer Zeit der letzteren Ansicht besonders zugethan und zwar deshalb, weil dieselbe die durch Ausschluss allein übrig bleibende Hypothese ist, nachdem eine thermische Hypothese schon im Keime an der Erfahrung erstickte, dass die thermisch wirksamsten Strahlen grösster Wellenlänge, trotzdem sie den Augengrund genügend erreichen, die Netzhaut gar nicht afficiren. Ausserdem sind es die bekannten ungemein langen Nachwirkungen des Lichtes im Auge, welche der chemischen Auffassung von jeher besondere Gunst erworben haben.

Auffallender Weise ist die photochemische Hypothese des Sehens[2] bis vor wenigen Jahren in der physiologischen Literatur kaum anders, als beiläufig geäussert worden; es würde daher in keiner Hinsicht förderlich sein, die darauf bezüglichen sehr zerstreuten Aeusserungen vollständig zusammen zu tragen. Zum Beweise, wie vollkommen und einstimmig die Zeitgenossen von der Berechtigung der photochemischen Hypothese überzeugt sind, genügt es der sehr eingehend begründeten, viel umstrittenen Theorie des Sehens[3] von E. Hering zu erwähnen, nach welcher das Licht im Sehorgane eine Reihe abwech-

1 Die Entdeckung der chemischen Wirkung des Lichtes selbst veranlasste Moser, wenige Jahre, nachdem Niépce und Daguerre die Fixirung photochemisch entstandener Bilder erfunden hatten (1839), die Reaction der Retina für übereinstimmend mit den eigenthümlichen Veränderungen an der Oberfläche zahlreicher nicht organisirter Stoffe durch das Licht zu erklären. Freilich hielt Moser diese Vorgänge nicht für chemische (womit er nur bezüglich eines Theiles derselben im Rechte war), es gebührt ihm aber das Verdienst so zahlreiche und rapide Effecte jeder Art sichtbaren Lichtes erkannt und damit die Vergleichung mit solchen auf der Retina eröffnet zu haben, dass der erste Schritt auf dem Wege von Joh. Müller's damals schon mächtiger Lehre der specifischen Sinnesenergieen bis zur jetzigen Vorstellung über den Sehact geschehen konnte. Moser war es auch, der den zeitlichen Verlauf der Netzhauterregung und besonders die lange Nachwirkung zuerst im Sinne materieller Veränderungen des Endorganes am Sehnerven verwerthete. Vgl. L. Moser, Ueber den Process des Sehens und die Wirkung des Lichtes auf alle Körper. Ann. d. Physik CVI. S. 177. 1842.

2 Am präcisesten spricht sich J. Bernstein (Unters. über den Erregungsvorgang im Nerven- und Muskelsystem S. 133 f. Heidelberg 1871) sowohl über die Hypothese selbst, wie über die aus den angegebenen Gründen folgende Nothwendigkeit derselben aus.

3 E. Hering, Zur Lehre vom Lichtsinne. 6 Abhandl. Sitzgsber. d. Wiener Acad. 1872 u. 1873. 2. Aufl. Wien 1878.

selnder und gegensätzlicher Processe auslöst, wobei die chemische Angriffsweise des Lichtes in der Netzhaut vorausgesetzt wurde, ohne jemals auf Widerspruch zu stossen.

ERSTES CAPITEL.

Chemie der Netzhaut.

1. Allgemeines chemisches Verhalten.

Die winzige Masse der Netzhaut verweist chemische Untersuchungen ihrer Gewebe auf das mikrochemische Gebiet und auf dessen im Entstehen begriffene Methoden der Gewebsanalyse, welchen die Verwerthung gröberer Befunde an Organen gemischten Baues erst zufällt. Da die Netzhaut aus Sinnesepithel und grauer Nervenmasse besteht, muss ihre chemische Zusammensetzung eine sehr verwickelte sein, deren Verständniss nicht zu hoffen ist, ohne sorgfältige Scheidung des anatomischen Substrates. Alles, was im Hirn vorkommt, ist in der Retina zu erwarten, während darin ausserdem specifische Bestandtheile des Sehepithels zu berücksichtigen sein werden. Die Histochemie hat im gröberen und im feineren Sinne unter den Geweben zu unterscheiden, welchein den Bau der Netzhaut eingehen; in der grauen Substanz: Fasern, Zellen und Verwandtes (Körner), sowie Bindegewebe und Stützapparate; im Epithelium: das eigentliche Epithel und die Sehzellen (Stäbchen und Zapfen).

Die Netzhaut als Ganzes ist zuerst von C. Schmidt[1] untersucht. Er erhielt daraus neben Albumin eine weder mit dem Glutin noch mit Mucin oder sog. Chondrin übereinstimmende Materie, aus dem Alkoholextrakte einen mit Platinchlorid krystallisirenden, stark nach Trimethylamin riechenden Körper; letzteres ist ein jetzt verständlicher Befund, da alles nervöse Gewebe Lecithin enthält, aus welchem durch Zersetzung Cholin entsteht, das bei der Zersetzung durch Fäulniss und andere Einflüsse Trimethylamin liefert.

Auf Rollett's Veranlassung untersuchte Chodin[2] die Reaction der Netzhaut und des N. opticus. Er fand den frischen Opticusquer-

1 C. Schmidt, mitgetheilt bei R. Blessig, De retinae textur. disquis. microsc. Dissert. inaug. Dorpat 1855.

2 A. Chodin, Ueber die chemische Reaction der Netzhaut und des Sehnerven. Sitzgsber. d. Wiener Acad. 1877. 19. Juli.

schnitt von Fröschen und Kaninchen deutlich sauer, nach mindestens 24—48 stündigem Dunkelaufenthalte der Thiere neutral oder alkalisch. Ebenfalls saure Reaction auf Lackmustäfelchen, die hier allen andern Reagentien vorzuziehen sind, erhielt Chodin in der Regel von frischen Netzhäuten, um so deutlicher, je vollkommner der Glaskörper mit Fliesspapier abgesogen oder mit Salzwasser abgespült worden, oder nachdem die anfänglich alkalisch reagirende Membran zerquetscht worden, besonders wenn zugleich Licht darauf wirkte. Die Netzhaut lange im Dunkeln gehaltener Thiere schien schwächer sauer zu reagiren oder nach dem Zerquetschen nicht so leicht sauer zu werden. Froschnetzhäute, die ich nach dem Abspülen des Glaskörpers bei Dunkelfröschen immer alkalisch und weder beim Zerquetschen noch nach Belichtung sauer gefunden[1], zeigen nach Chodin am wenigsten constante Reaction, neigten jedoch nach Einwirkung von Licht oder nach der Zerstörung mehr zu saurer, als alkalischer Beschaffenheit. Da Gscheidlen[2] die graue Substanz des Gehirns und des Rückenmarkes immer sauer reagiren sah und Chodin das Gleiche an der weissen Substanz beim Hunde, obschon weniger ausgeprägt bemerkte, so liegen hier z. Th. den nervösen Leitapparat und die graue Substanz der Netzhaut betreffende Reactionen vor.

Da sich die Netzhaut im Tode auffallend trübt und das weisslich opake Ansehen sich mit steigender Temperatur schneller entwickelt, beim Frosche plötzlich, wenn die Retina in 45° C. warmes Salzwasser geworfen wird[3], so sind nach Art des Myosins gerinnende Substanzen in ihren Geweben wahrscheinlich enthalten. Die plötzliche Trübung betrifft besonders die vorderen Schichten.

Die Chemie der grauen Retinasubstanz fällt mit der der nervösen Centralorgane zusammen und hat hier kein specielleres Interesse, weil sie für das Sehen nur in soweit Beachtung beanspruchen würde, als dabei überhaupt chemische Vorgänge in dem leitenden Apparate in Frage kommen, wie in jedem andern Sinnesorgane oder in nervösen Einrichtungen, welche ausser Nervenfasern auch gangliöse Elemente enthalten. Nur wegen der Verbindung und wegen des genetischen Zusammenhanges des Sehepithels mit jenen Geweben ist hier des geformten und chemisch definirten N e u r o k e r a t i n s zu gedenken, welches im gesammten grauen und weissen Nervensysteme der Wirbelthiere unter der verschiedensten Gestalt vorkommt. Dasselbe bildet im Opticus Scheiden und Netze, welche

1 W. Kühne, Ueber den Sehpurpur. Unters. a. d. physiol. Inst. d. Univers. Heidelberg. I. S. 22.

2 R. Gscheidlen, Ueber die Reaction der nervösen Centralorgane. Arch. f. d. ges. Physiol. VIII. S. 171.

3 A. Ewald und W. Kühne, Untersuchungen über den Sehpurpur. Unters. a. d. physiol. Inst. z. Heidelberg I. S. 44.

sich in die Retina mit Umgehung der blassen Nervenfasern fortsetzen und in Gestalt des von Max Schultze beschriebenen Stützapparates alle Schichten bis zur M. limitans ext. durchziehen.[1] Die Radialfasern bestehen nach Kuhnt's Beobachtungen[2] nicht aus jenem allen Lösungs- und Verdauungsmitteln, mit Ausnahme heisser Kalilauge und Schwefelsäure, widerstehenden Keratin. Dass gefässhaltige Netzhäute auch Bindegewebe, folglich Collagen, Elastin und Mucinogen enthalten, bedarf der Erwähnung kaum. Die M. limitans hyaloidea s. ant. scheint zu den verdaulichen Glashäuten zu gehören.

Die graue Substanz der Netzhaut zeigt im übervioletten Lichte schwache weissbläuliche Fluorescenz[3], die an der vorderen natürlichen, wie an der hinteren, des Epithels und der Stäbchenschicht beraubten Oberfläche mit gleicher Deutlichkeit zu sehen und wenig veränderlich ist.

II. Chemie des phototropen Epithels.

Das Retinaepithel, die Stäbchen und die Zapfen sind die dem Sehorgane eigenthümlichen nach Bau und Mischung nirgends in andern Körpertheilen ihres Gleichen findenden Elementarorganismen. Wir bezeichnen dieses gesammte Sinnesepithel des Auges als das phototrope, als das eigentliche periphere Sehorgan. Die mikroskopische Anatomie lehrt den Zusammenhang der Sinnesepithelien mit dem nervösen Leitapparate und es dürfte die Grenze, wo das Sinnesepithel in die Nervenfaser übergeht, für die Stäbchen an dem Punkte zu suchen sein, wo vor dem Kerne die varicöse Faser beginnt, für die Zapfen an der Stelle, wo aus ihrem breiten, nach vorn gerichteten Fusse einzelne Fäserchen entspringen. Verbindungen des äussersten Retinaepithels mit dem Leitapparate sind nicht bekannt. In dem Folgenden werden die Stäbchen und Zapfen als Sehepithel und Sehzellen, das äusserste Epithel wie gewöhnlich als Retinaepithel bezeichnet werden.

1. Chemie des Retinaepithels.

Bis an diese äusserste Schicht der Netzhaut reicht das für nervöse, wie für epitheliale, aus dem Hornblatte entwickelte Bildungen charakteristische Neurokeratin. Bei aller Zartheit sind die Zellen des

1 A. Ewald und W. Kühne, Ueber einen neuen Bestandtheil des Nervensystems. Verh. d. naturhist.-med. Ver. z. Heidelberg. N. F. I. S. 457. 1876.

2 H. Kuhnt, Zur Architektonik der Retina. Klin. Monatsbl. f. Augenheilkunde XV. Beilage. S. 72.

3 A. Ewald und W. Kühne, Unters. a. d. physiol. Inst. z. Heidelberg I. S. 171.

retinalen Epithels von einem Hute jenes resistenten Stoffes überzogen, den sie zwar oft verlieren und im Augengrunde zurücklassen, nachdem sie daraus abgestreift worden. Nach Kuhnt's Beobachtungen[1] überzieht der unverdauliche Hut die nicht gebräunte Kuppe des Zellenleibes etwa bis an die Zone, wo das schwarzbraune Pigment und die Basis der Zelle beginnt. Hier verschmilzt er nach Angelucci[2], dessen spätere Ausführungen sich bezüglich des Hutes mit denen Kuhnt's vollkommen decken, am Rande mit den Hüten der Nachbarzellen, so dass sämmtliche Zellen in dieser Zone mittelst einer continuirlichen Neurokeratinschicht zusammenhängen. Die Ränder der Hüte sind mit den früher namentlich von Schwalbe[3] beschriebenen festen Kittleisten zwischen den Zellen identisch und die Ursache einer lange bekannten scharfen Linie, welche man über die betreffende Gegend der Epithelzellen an Durchschnitten der gesammten Retina verlaufen sieht.

An den einzelnen Epithelzellen werden unterschieden: die ungebräunte Kuppe, die Basis und die Fortsätze. Der Kern liegt immer an der Grenze von Kuppe und Basis. Die Basis ist keine compakte Masse, sondern eine von so vielen weiten, cylindrischen Canälen durchsetzte Scheibe, als Stäbchen an ihren äussersten Enden von der Zelle umgriffen werden. Von der Basis entspringen die nach Gestalt und Pigmentfüllung wechselnden Fortsätze, welche weit nach vorn in die Zwischenräume der Stäbchen, bis zu den Zapfen und bis an die M. limitans ext. reichen können.

A) Die Kuppe der Epithelzellen.

Die Kuppe enthält glänzendes, farbloses, zuweilen etwas streifiges Protoplasma, nach vorn mit einem, seltener mit zwei durchsichtigen, ellipsoïden Kernen versehen, deren lange Axe senkrecht zur Längsaxe der Zelle steht. Der Kerninhalt ist klar, mit 1 bis 2 Kernkörperchen versehen. Die Kerne schrumpfen in Säuren, sind in NaCl von 10 pCt. unlöslich, in Alkalien sehr quellbar und widerstehen neutraler Trypsinverdauung; sie dürften daher hauptsächlich aus Nucleïnen bestehen. Das sehr weiche Protoplasma der Kuppe ist, wie das der Basis und der Fortsätze in verdünnten Säuren etwas quellbar, zergeht allmählich etwas in NaCl von 10 pCt. und löst sich mit grösster Leichtigkeit unter Hinterlassung des Kerns und des braunen Pigmentes, das nach allen Richtungen auseinander stiebt, in Galle

1 Kuhnt a. a. O. S. 79.
2 Angelucci, Arch. f. Anat. u. Physiol. Physiol. Abth. 1878. S. 353.
3 G. Schwalbe, Handb. d. Augenheilk. v. Graefe u. Saemisch I. S. 424.

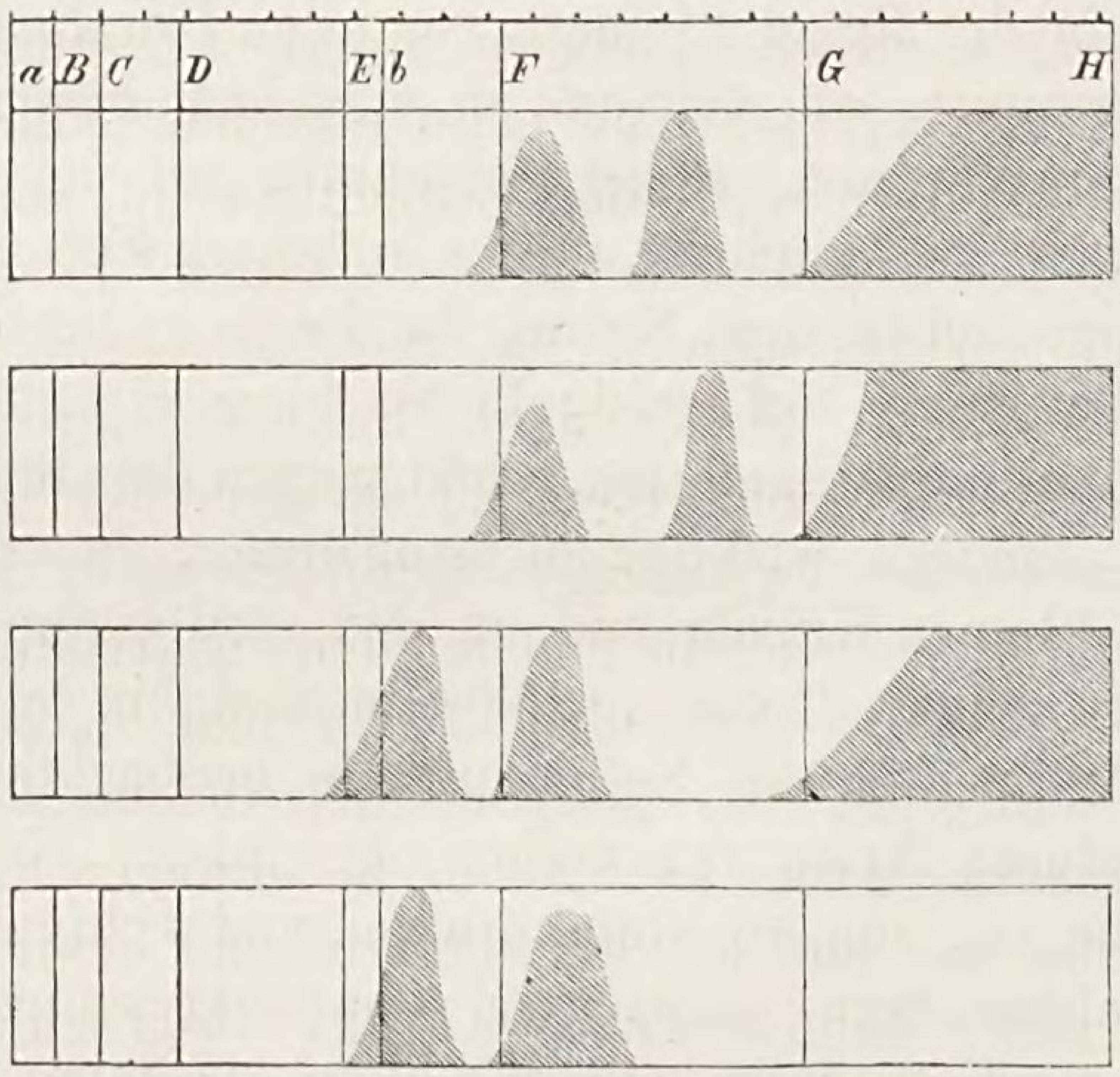
von 1—5 pCt. Das Pigment ragt in die Kuppe der Zellen nur am Rande etwas empor, immer, so lange die Zellen frisch sind, in genügender Menge um beim Anblicke von hinten die Rahmen, durch welche die Epithelzellen zusammenhängen, zu verwischen oder ganz zu verdecken. Einige Zeit nach dem Tode zieht es sich vom Rande gegen die Axe der Zelle zurück, so dass die Zellgrenzen jetzt breiter erscheinen, als sie wirklich sind. Das vorn an die Kuppe grenzende und das sich darin im Umfange erhebende Pigment besteht vorzugsweise aus Kügelchen und Körnchen, nicht aus Nadeln oder anderen länglichen Formen.

Ausschliesslich in der Kuppe treten als Einlagerungen des Protoplasmas mehr oder minder gefärbtes Fett und Myeloïdkörner auf.

Das Epithelfett. Das Retinalepithel mancher Thiere enthält auffallende Mengen Fett. Beim Frosche, bei einzelnen Vögeln und bei Kaninchen, besonders bei albinotischen, kommt es constant vor, während es beim Menschen, dem Rinde und Schweine bisher vermisst wurde. Meist tritt es in Gestalt je eines grossen, den Umfang des Kernes erreichenden, zuweilen übertreffenden Tropfens auf, von starkem Fettglanze und geringer Consistenz. Sind mehrere Tropfen vorhanden, so sind es in der Regel kleinere von allen Durchmessern um einen grösseren gruppirt, an welchem in einzelnen Fällen Abschnürungs- oder Theilungsformen, selbst Schichtung an der Oberfläche zu erkennen ist. Gewöhnlich ist dieses sichtbare Fett in der vorderen Zone der Kuppe neben dem Kerne, der Basis genähert abgelagert. Beim Frosche ist es tief goldgelb bis blass citronfarben, besonders hell, wo Zertheilung eingetreten, nicht wegen der dünneren Ausbreitung scheinbar, sondern wirklich farbstoffärmer, da es auch in dichten Haufen der kleinen Kugeln und an den restirenden grösseren die blasse Nuance zeigt. Unter den Vögeln sind bis jetzt nur bei einzelnen Eulen Fetttropfen des Retinaepithels beobachtet, bei einigen farblos, bei anderen Arten von gelber bis oranger Färbung. Je tiefer hier die Farbe ist, um so kleinkörniger und eckiger sind die Ablagerungen, welche dann vorwiegend aus ausgeschiedenem Farbstoffe, dem nur wenig Fett mehr beigemischt ist, bestehen. Die grossen Fetttropfen der Kaninchennetzhaut sind kaum als gefärbt zu bezeichnen. Alles Epithelfett der Retina bleibt bei niederen Temperaturen weich und dürfte daher wesentlich Oleïn enthalten. Aus den Zellen ist es sehr leicht mit Alkoholäther, mit Benzol oder Schwefelkohlenstoff zu extrahiren; Alkalien und Galle greifen es nicht an; Osmiumsäure färbt die Kugeln mit grosser Geschwindigkeit tiefbraun.

Das Lipochrin.[1] Zur Untersuchung des Farbstoffes der Fettkugeln fand sich bis jetzt nur im Froschauge Material. Man säubert die Bulbi von allem anhängenden Fette und Muskelfleische, halbirt sie, nimmt die Netzhaut epithellos heraus und wirft die mit der Uvea und dem Epithel versehenen hinteren Skleralabschnitte sogleich in absoluten Alkohol. Einige Tausend so gesammelter Augen färben den Alkohol nur schwach, doch wird derselbe, um auch die kleinste Menge Farbstoff nicht zu verlieren, verdunstet und der Rückstand mit wenig Aether aufgenommen, welchen man dem viel tiefer gefärbten Aetherextrakte der aus dem Alkohol genommenen Augen hinzufügt. Beim Verdunsten des Aethers bleibt ein stark gelb gefärbtes, schmieriges Fett zurück, während die mit Aether erschöpften Augen an Chloroform, Benzol, Petroläther, Schwefelkohlenstoff und Terpenthinöl, auch an heisses Parafin nichts Färbendes mehr abgeben.

Die Farbe des retinalen Fettes ist von der des bekannten Froschfettes in den Fettlappen der Bauchhöhle nicht zu unterscheiden. Beide geben in Aether gelöst das Absorptionsspectrum Fig. 1 *A*, in



Sonnenspectrum.

A. Froschfett in Aether.

B. Lipochrin aus dem Retinaepithel oder dem Fette des Frosches in Aether.

C. Retinaepithel vom Frosche in CS_2.

D. Lipochrin in CS_2.

Fig. 1

Schwefelkohlenstoff gelöst das von Fig. 1 *C*. In heisser alkoholischer Lösung mit Aetznatron versetzt liefern sie eine gelbe Seife, aus welcher Aether den Farbstoff fettfrei, nur mit Spuren nicht entfernbarer Seife verunreinigt aufnimmt und als stets amorphen schön-

1 W. KÜHNE und W. C. AYRES, Ueber lichtbeständige Farben der Netzhaut. a. a. O. S. 341.

gelben Rückstand hinterlässt. Mit der Lösung des gereinigten Lipochrins erhält man das Spectrum Fig. 1 *B*, aus der tief orangefarbenen in Schwefelkohlenstoff das von Fig. 1 *D*. Der Verdunstungsrückstand der Schwefelkohlenstofflösung löst sich in Aether wieder mit gelber Farbe, welche die gleiche Absorption zeigt, wie vor der Einwirkung des Schwefelkohlenstoffs: letzterer ändert also die Substanz, trotz der starken Verwandlung, welche die Farbe darin erleidet, nicht.

Das Lipochrin wird von Jod-Jodkaliumlösung, der etwas Alkohol zugesetzt worden, grünlich bis bläulich grün, von Salpetersäure, die wenig salpetrige Säure enthält, vorübergehend grünblau, von concentrirter Schwefelsäure dunkelviolett bis blau gefärbt. In Alkohol oder in Aether, auch in Fetten gelöst, in Papier imbibirt oder durch farblose Galle in wässerige Lösung gebracht bleicht es am intensivsten Sonnenlichte in 2—3 Stunden aus, wenn die Lösungsschichten dünn genug sind. Die so erhaltene farblose Substanz wird im Dunkeln nicht wieder gelblich. Durch Ozon wird das Lipochrin im Dunkeln entfärbt.

Schon THUDICHUM [1] machte auf einen besondern gelben Farbstoff mancher thierischen Fette aufmerksam und hielt denselben für identisch mit dem von LIEBEN und PICCOLO [2] aus dem Corpus luteum der Kuh dargestellten, krystallinischen, später Luteïn genannten Pigmente, das ehedem von STÄDELER und HOLM [3] fälschlich für Bilirubin gehalten worden. Von demselben Körper sollte nach THUDICHUM auch die Farbe der Hühnereidotter herrühren. Ohne Zweifel sind alle diese Farbstoffe mit einander und mit noch einigen andern in den Zapfen vieler Vögel und Reptilien vorkommenden verwandt, mit denen sie auch die mässige Lichtempfindlichkeit, welche HOPPE-SEYLER [4] zuerst vom Luteïn erwähnte, und die von SCHWALBE [5] an den Zapfenkugeln gefundene Blaufärbung durch Jod theilen. Diese Pigmente nehmen sämmtlich mit Salpetersäure die blaugrüne, mit Schwefelsäure die dunkelblauviolette, schon von STÄDELER und HOLM am Luteïn beobachtete Färbung an. CAPRANICA [6] der diese Reactionen an den Oelkugeln des retinalen Epithels vom Frosch mit Erfolg anstellte, bemerkte auch an den Luteïnkrystallen Blaufärbung durch Jod. Trotz der Uebereinstimmung in den genannten Reactionen sind die Pigmente unter einander so verschieden, wie vom Bilirubin, mit welchem das Luteïn so lange verwechselt worden, da sie sowohl im Grade der Zersetzlichkeit durch Licht, wie durch die dem Auge direkt erkennbaren Farbenunterschiede von einander abweichen und keiner ausser dem Luteïn

1 THUDICHUM, Centralbl. f. d. med. Wiss. 1861. Nr. 1.
2 PICCOLO und LIEBEN, Giorn. d. scz. nat. II. Palermo 1866.
3 STAEDELER und HOLM, Journ. f. pract. Chemie CIV. S. 257. 1868.
4 HOPPE-SEYLER. Handb. d. physiol. u. path.-chem. Analyse 1870. S. 186.
5 G. SCHWALBE a. a. O. S. 414.
6 ST. CAPRANICA, Arch. f. Anat. u. Physiol. Physiol. Abth. 1877. S. 285.

krystallinisch erhalten werden konnte. Entscheidend für die Verschiedenheit ist das spectroscopische Verhalten, welches grosse Differenzen der Lichtabsorption, kenntlich an den sehr verschieden gebänderten Spectren des Lipochrins, der Pigmente des Epithels und des Luteïns aufdeckt.[1] Beachtung verdient es, dass das Epithelfett der Retina beim Kaninchen, dessen Fettgewebe so gut wie farblos ist, ebensowenig gefärbt ist. Aus der Haut des Frosches nimmt Aether, besonders nach vorgängiger Verdauung, ziemlich viel gelbes Pigment von dem angegebenen Verhalten des Lipochrins auf, welchem zuweilen ein grünlich aussehender, vielleicht blauer, am besten in Chloroform löslicher Farbstoff beigemengt zu sein scheint.

Die Myeloïdkörner. Das Protoplasma der Epithelkuppen ist häufig der Sitz eigenthümlicher farbloser Ablagerungen, von wachsartigem Glanze und kugliger, abgestumpft eckiger, halbmondförmiger, walzen- und wurstartiger Gestalt. Früher vielleicht schon gesehen aber irrthümlich für farbloses Fett gehalten[2], wurden sie von Ewald und mir[3] vom Fette unterschieden, beim Frosche oft in erstaunlicher Menge gefunden und zuerst als „farblose Klümpchen" bezeichnet. Dieselben nehmen zunächst immer den äussersten Raum der Zellkuppe hinter dem Kerne ein, treten aber zuweilen in solcher Menge auf, dass sie die Kuppe fast ganz erfüllen und zwischen die Fetttropfen, selbst in die Basis der Zellen gedrängt werden. Die Myeloidkörner geben an Alkohol, Aether, Chloroform, Benzol u. s. w. unzweifelhaft etwas ab, sind darin aber weder löslich noch quellbar. Mit Osmiumsäure färben sie sich viel langsamer, als die nebenliegenden Fetttropfen, indem sie nach und nach schmutzig braungrün werden. In Alkalien sogleich colossal quellend und darin allmählich zergehend, unterscheiden sie sich vom Fett auf das schärfste. Charakteristisch ist ferner die ungemein leichte Löslichkeit der Körner in Galle von 1—5 pCt. Bei der Chemie der Retinastäbchen wird diese, nach den angeführten Reactionen dem sog. Myelin des Nervenmarkes am meisten verwandte und deshalb passend als Myeloïd zu bezeichnende Substanz genauer erörtert werden. Sie wurde von uns bisher nur im Retinaepithel des Frosches, einiger Eulen und des Bussards gefunden. Beim Frosche kommen die Myeloïdkörner nicht ganz constant vor, doch dürften wenigstens einige Epithelzellen der Netzhaut sie immer enthalten. Alle Grade der Anfüllung mit Myeloïdkörnern werden sowohl bei dunkel, wie bei hell gehaltenen und bei abwechselnd belichteten Fröschen im Epithel gefunden.

1 Vgl. Kühne und Ayres a. a. O. Taf. III, IV, V.

2 Fr. Boll, Zur Anat. u. Physiol. d. Retina. Arch. f. Anat. u. Physiol. Physiol. Abth. 1877. S. 1.

3 a. a. O. S. 287.

B) Basis und Fortsätze der Epithelzellen.

Das Epithelpigment erfüllt die Zellen in sehr verschiedener Weise und fehlt manchen bekanntlich ganz. Ohne Ausnahme pigmentlos sind die Epithelien der Albinos (Kaninchen, Ratten, Tauben), mehr oder minder pigmentarm die vor dem, bei Thieren so häufigen, glänzenden Tapetum gelegenen. Bei den Raubthieren unter den Säugern und bei vielen Fischen enthalten die tapetalen Epithelien der Retina an Stelle des Pigmentes eine in grösseren Mengen gelblich aussehende Einlagerung stark irisirender Krystalle, beim Hunde und der Katze von äusserster Feinheit und Biegsamkeit eine Art Filz bildend, bei den Fischen mehr vereinzelt liegend und von ziemlicher Grösse, so dass Messungen daran ausführbar sind.

Das Fuscin. Das braune Pigment wird zweckmässig als Fuscin benannt, weil der Name seine Farbe besser ausdrückt, als das dafür bisweilen gebrauchte Wort Melanin und weil es bedenklich wäre, das epitheliale Augenpigment mit der vorzugsweise als Melanin benannten, braunen, bis schwarzen Materie vieler anderer Fundorte durch die Benennung zu identificiren. Alles retinale Fuscin der Wirbelthiere ist im durchfallenden Lichte noch bei erheblicher Schichtendicke braun, nicht schwarz, verdünnt niemals so neutral grau, wie bei vielen Wirbellosen. Der Nuance nach stimmt es bemerkenswerth mit dem jedesmaligen Aussehen der Chorioïdea überein, beim Menschen und den Vögeln, wo es sich von neutralen Tinten am meisten entfernt, am auffallendsten, so dass die mit dem Epithel hervorgezogene Netzhaut mit dem entleerten Grunde identisch hell zimmtfarben, nuss- oder chocoladebraun bis schwarzbraun erscheint.

Während das Pigment der Chorioïdea nur kugelige und kurz gedrungene, wenig kantige Formen zeigt, tritt das Fuscin in den retinalen Epithelzellen vieler Thiere nur zum kleinsten Theile so amorph, grösstentheils mit länglich spindelförmigen oder in so gekanteten Gestalten auf, dass es für krystallinisch zu halten ist. Am meisten nadelförmig ist es bei den Vögeln, am körnigsten, so dass die krystallinische Structur zuweilen zweifelhaft wird, bei vielen Säugern, besonders beim Menschen. Oft sind einzelne Theilchen auffallend hell, fast gelb und kaum braun, ohne darum dünner oder kleiner zu sein, so dass man entweder verschiedene Pigmente, odes ein farbloses von Fuscin nur tingirtes Substrat vermuthen möchte.

Das Fuscin reicht zwar von den Wänden der Epithelkuppen etwas nach hinten, steigt aber unter keinen Umständen soweit in die Kuppe empor, dass nicht ein beträchtlicher, von diesem Pig-

mente freier Raum übrig bliebe. Die eigentliche Stätte des Fuscins ist die Zellenbasis mit ihren Fortsätzen, gewöhnlich erst von einer Ebene an, welche die Stäbchenkuppen noch schneidet, so dass es also nirgends in der Zelle in Gestalt einer zusammenhängenden Platte, sondern nur zu Kränzen oder kurzen Cylindermänteln angeordnet auftreten kann. Bis soweit liegen seine länglichen Theilchen in allen Richtungen durcheinander, während es in den Fortsätzen, wo es die Stäbchen nicht mehr am ganzen Umfange überzieht, reihenweis angeordnet ist und die Nadeln vorwiegend mit der Längsaxe parallel zu der der Stäbchen liegen.

Den ersten Versuch das Fuscin vom Gewebe zu trennen machte Rosow.[1] Er suchte es durch Waschen der aus den Augengründen gepflückten Epithelschichten zu isoliren, indem er das mitgeführte Gewebe durch Fäulniss erweicht oder gelöst entfernte, ein Verfahren, das kein sauberes Präparat liefert, weil Bacterienleiber in grosser Menge an den Fuscintheilchen haften und durch Schlemmen, Decantiren oder Filtriren nicht zu entfernen sind. So weit es denkbar ist eine Substanz, ohne sie einmal in Lösung übergeführt zu haben, als Rückstand zu isoliren, ist dies mit dem Fuscin zu erreichen, freilich nur für kleine Mengen. Man behandelt dazu epithelführende, von der Chorioïdea getrennte Netzhäute mit Galle, die daraus alsbald eine dunkle, ohne Aenderung der Farbe durch Papier filtrirende Tinte bildet. Die durch das Filter gegangenen Fuscintheilchen setzen sich in flachen Uhrgläsern nach einiger Zeit so vollkommen ab, dass die Flüssigkeit mit feinen Pipetten abgesogen werden kann, ein Mittel, das weiterhin allein benutzt wird, weil das Pigment, auch wenn es sich noch zusammenballt, durch Filter theils verloren geht, theils wegen des Eindringens in die Poren mit Cellulose verunreinigt wird, wenn man es abzunehmen versucht. Der Bodensatz wird mit Wasser zur Entfernung der Galle gewaschen, darauf einer 24 stündigen alkalischen Trypsinverdauung, zur Verhütung der Bacterienbildung unter Zusatz von Thymol, unterworfen, um allenfalls mit dem Fuscin durch das Filter geschlüpfte, eiweisshaltige Massen (von denen mikroskopisch allerdings nie etwas zu entdecken ist) zu entfernen, weiter wiederholt mit Wasser, endlich mit Alkohol und Aether extrahirt. Man gewinnt so einen beim Verdunsten der letzten Aethertropfen am Uhrglase haftenden, im durchfallenden Lichte schwarzbraunen, im auffallenden bläulich schwarzen Anflug, der nur aus Fuscin besteht.

In ähnlicher Weise wird aus der Chorioïdea des Frosches ein,

1 Rosow, Arch. f. Ophthalmologie IX. Abth. 3. S. 65.

abgesehen von der theilweise krystallinischen Beschaffenheit, von dem epithelialen in keinem Punkte abweichendes Fuscin erhalten, dessen hier gedacht wird, weil es bis heute nur möglich ist das Epithelfuscin in grösseren Mengen zu erhalten, wenn auf die Scheidung von jenem verzichtet wird. In kleinen, zur Controle genügenden Antheilen wird das chorioïdale Fuscin rein gewonnen, indem man aus den vom Epithel zugleich mit der ganzen Retina entleerten Augengründen die Uvea herauspflückt, mit Galle schüttelt und mit Wasser wäscht, um jede Spur etwa zurückgebliebenen Epithels, sammt dessen Pigment fortzuspülen, die übrig bleibenden schwarzen Flocken in Wasser aufkocht und mit Trypsin, welches nach diesen Vorbereitungen das Gewebe mit Einschluss des Collagens auflöst, verdaut. Um aus dem Rückstande die Nucleïne zu entfernen, ist derselbe mit sehr verdünntem Alkali zu extrahiren. Das unveränderte Pigment bildet dann einen schwarzen Bodensatz, der weiter durch Schlemmen, wie es beim Fuscin angegeben, zu reinigen ist.

Die vereinigten Pigmente des Augengrundes sind von K. Mays [1] aus Frosch- und Säugeraugen und besonders aus denen von Hühnern nach folgender Methode dargestellt. Mehr als 500 hintere Augenhälften wurden frisch in Alkohol geworfen, mit kochendem Alkohol, darauf mit Aether, zuletzt durch Kochen mit Wasser extrahirt. Nach 24stündiger energischer Trypsinverdauung blieb das Pigment mit einigen Stückchen verknöcherter Sklera, welche leicht beim Durchgiessen durch Gaze abzufangen waren, zurück. In dem nach einer letzten Reinigung mit Alkali von Nucleïnen befreiten Fuscin noch zu vermuthendes Neurokeratin, das aus den Netzhäuten ebenfalls ungelöst hätte zurückbleiben müssen, fand sich mikroskopisch nicht angedeutet. Das Neurokeratin scheint demnach durch Schlemmen vom Fuscin trennbar zu sein, wenn es nicht bei dem öfter befolgten Filtriren durch Gaze, an der es sehr haftet, unbeabsichtigt verloren gegangen war.

Kein chemisches Reagens löst oder zersetzt das Fuscin sofort; concentrirte Säuren und Alkalien bedürfen dazu längerer Zeit oder des Erhitzens. Bei längerem Kochen färbt das Fuscin concentrirte Schwefelsäure schwarzbraun, Natronlauge und Salpetersäure gelb, ohne mehr als Spuren zu verlieren. Wie Rosow fand und Mays bestätigte, wird das Fuscin nach längerer Behandlung mit verdünnter Salpetersäure in ätzendem und kohlensaurem Alkali, sowie in Ammoniak leicht löslich. Diese Lösungen sind Rosow's Angaben entgegen, nach welchen sie

1 K. Mays, Unters. a. d. physiol. Inst. z. Heidelberg II. S. 324.

schön violetroth sein sollen, gelb, auch wenn sie aus ganz reinem Epithelfuscin gewonnen werden. Aus diesen alkalischen Lösungen gefärbte Niederschläge durch Neutralisiren zu erhalten, gelang Mays nicht.

Bei der grossen Resistenz des Fuscins gegen chemische Eingriffe ist seine Empfindlichkeit gegen Licht um so überraschender. Dieselbe ist zwar nicht bedeutend, aber doch im intensivsten Sonnenlichte im Laufe einiger Stunden zu bemerken, wenn man es recht blass auf weissem Porzellan ausmalt und eine scharf begrenzte Vergleichsstelle vor Licht schützt. Mit Luft eingeschlossene mikroskopische Präparate des retinalen Epithels, hinreichend belichtet, zeigen den Gang der Veränderung ebenfalls; besonders die in den Fortsätzen der Zellen einzeln liegenden Nadeln werden nach und nach heller, dann blassgelb, endlich farblos, ohne sich in den Zusatzflüssigkeiten, die am besten aus 0,5 pCt. NaCl-Lösung oder äusserst verdünnter Soda bestehen, nachweisbar zu lösen. Damit solche Präparate nicht durch Fäulniss zerfallen ist es nöthig sie mit Spuren von Thymol zu versetzen, nicht mit Salicylsäure, weil Säuren die Lichtempfindlichkeit ausserordentlich schwächen.

Das Gelbwerden und die Entfärbung des Fuscins am Lichte ist nicht von Erwärmung bedingt: es tritt bei dauernd kalt gehaltenen Präparaten ein, während es unter berussten von der Sonne beschienenen Gläsern, welche die thermisch wirksamsten Strahlen durchlassen, an trockenen Objecten nach Monaten und Jahren nicht erfolgt. Im trockenen Zustande verläuft die photochemische Veränderung etwas langsamer, als in Gegenwart von Wasser, am schnellsten in alkalischen Flüssigkeiten. Sehr dunkel ausgemalte Streifen, über Schwefelsäure an einem sonnigen Platze aufgestellt, werden nach etwa 1—2 Sommermonaten orange bis gelb, nach einem weiteren Monat farblos. Im Laufe eines trüben Winters gab eine mit Fuscin nussbraun bemalte Platte, die mit einem photographischen Negativ bedeckt unter Oberlicht gelegen hatte, ein leidlich detaillirtes Photogramm.

Unter Ausschluss des Sauerstoffs, im luftleeren Raume, oder in Kohlensäure wird das Fuscin durch Licht gar nicht verändert, weder im trocknen, noch im feuchten Zustande, ebenso wenig in Gegenwart von Alkali. Mikroskopische Präparate, an welchen man sich von der Lichtempfindlichkeit überzeugen will, dürfen darum nur in sog. feuchte Kammern, nicht in der gewöhnlichen Weise unter Deckgläsern, mit einem möglichst grossen Luftvolum eingeschlossen werden. Mays, der diese Beobachtungen bestätigte, fand, dass die Belichtung in Gegenwart von Sauerstoff auch die Löslichkeit des Fuscins beein-

flusst, so dass z. B. Suspensionen des Pigments namentlich in verdünnter Soda bald klare, gelbe Lösungen gaben. Merkwürdiger Weise wurden diese Lösungen durch Licht weniger schnell gebleicht, als das überschüssige, darin wieder zu Boden sinkende Pigment. In geringerem Grade wird das Fuscin bei Einwirkung von Luft und Licht sogar in Wasser und in sauren Flüssigkeiten (Salicylsäure von 0,2 pCt.) löslich. Von Wasser, verdünnter Soda oder ätzendem Alkali wird das Fuscin nach Mays' Beobachtungen unter Abschluss des Sauerstoffs auch durch tagelanges Erhitzen auf 100° C. weder gelöst noch in der Farbe geändert, während Siedehitze in Gegenwart von Sauerstoff kleine Antheile des so befeuchteten Pigmentes nach 6—8 Stunden löslich macht. Aus der am intensivsten gefärbten alkalischen Lösung ist es darauf durch Ansäuern in Gestalt eines oft erst nach Tagen zu Boden gehenden Niederschlages fällbar, der aus amorphen hellbraunen Flocken besteht.

Ohne Zweifel besteht die mit Bleichung abschliessende Aenderung des Fuscins am Lichte und unter dem Einflusse der Siedehitze in einer Oxydation. Wie Mays fand, wird dieselbe ohne Licht auch durch Ozon nicht erzielt und auffallender Weise im Lichte von Ozon im Vergleiche zum atmosphärischen Sauerstoff nicht beschleunigt. Wenn aber das Fuscin zuvor durch Luft, Licht oder Wärme soweit umgewandelt worden, dass es in Lösung geht, so wird der gelbe gelöste Körper, der als das erste farbige Zersetzungsprodukt des Fuscins aufzufassen ist, von Ozon im Dunkeln sehr langsam, im Lichte ziemlich schnell bis auf ein äusserst blasses Gelb entfärbt. Alkaliche Flüssigkeiten (½ pCt. Pottasche) sind zum Constatiren dieses Verhaltens die geeignetsten.

Nach der Lichtempfindlichkeit zu urtheilen verhalten sich die Fuscine nicht bei allen Thieren gleich; Mays fand das der Eule schneller bleichend, als das des Frosches und des Huhnes, die beiden letzteren aber ziemlich übereinstimmend. Das zimmtfarbene Fuscin eines hochblonden Menschen sah ich bedeutend schneller bleichen, als das des Frosches.

Das von Mays dargestellte Fuscin hinterlässt wenig eisenhaltige Asche und ist ein stickstoffreicher Körper.

2. *Chemie des Sehepithels.*

(Stäbchen und Zapfen.)

Das Sehepithel besteht aus den Sehzellen: aus Stäbchen und Zapfen. Wo beide Formen und viele Stäbchen vorkommen reichen nur die letzteren mit den längeren Aussengliedern in die Basis der

retinalen Epithelzellen hinein, während bei überwiegenden Zapfen auch diese z. Th. bis an die fuscinfreie Kuppe nach hinten durchragen. In der stäbchenfreien Schlangennetzhaut überschreiten alle Zapfenaussenglieder die hintere Fuscinzone; wahrscheinlich ist dieses Verhalten auch für die Zapfen in der Fovea centralis des Menschen und des Affen. Aus Stäbchen und Zapfen gebildetes Sehepithel gleicht einer doppelten Claviatur deren vordere Reihe von den auch mit der Wurzel des Aussengliedes weiter vorgestellten Zapfen besteht.

A) Innenglieder der Sehzellen.

Nur die Aussenglieder der Stäbchen und Zapfen sind in chemischer Beziehung beachtet, obwohl es grosses Interesse hätte das mikrochemische Verhalten des so verschiedenartigen Inhaltes der Innenglieder ebenfalls zu untersuchen. Die letzteren besitzen wie alle zelligen Bestandtheile der Retina ein im Leben ausserordentlich durchsichtiges Protoplasma, worin erst nach dem Tode leichte, körnige Einlagerungen bemerklich werden, ferner Kerne, wie es scheint, vom allgemeinen Verhalten der meisten Zellkerne und bei vielen Thieren noch besondere, ebenfalls nach dem Absterben deutlicher hervortretende Gebilde von sehr auffallender Gestalt und Lichtbrechung, welche letztere grosse Verschiedenheit gegen die chemische Zusammensetzung des Protoplasmas andeutet. Es sind dies die bei niederen Wirbelthieren auch in den Stäbchen, bei den höheren vorwiegend in den Zapfen vorkommenden, kugligen, linsenförmigen und paraboloïden Körper von eigenthümlich starker Lichtbrechung und die von Max Schultze am entwickeltsten in den Zapfen des Menschen, aber auch im äusseren Theile des Innengliedes der Stäbchen gefundenen Faserkörbe. Alle diese Bildungen färben sich mit Osmiumsäure, obschon z. Th. recht schwach, eher und dunkler als das Protoplasma und scheinen theils den Fetten, theils dem sog. Myelin verwandt; bei vielen Reptilien und bei den Vögeln sind es in den Zapfen wahre Fettkugeln, welche überdies vielfach Pigmente enthalten. Endlich zeigen die Zapfeninnenglieder mancher Vögel und Reptilien ihre ganze Masse durchsetzende Einlagerungen eines bis zur feinsten Körnung vertheilten, rosenfarbenen oder gelben Pigments, das vermuthlich auch in dieser Gestalt noch mit Spuren von Fetten vereinigt ist.

B) Aussenglieder der Sehzellen.

(Cylinder und Kegel.)

Nicht allmählich, sondern plötzlich mit scharfer scheibenförmiger Grenze geht das äussere Glied aus dem inneren der Sehzelle, selbst

in dem Falle hervor, wo kein besonderer glänzender Körper die Grenze markirt. Die Aussenglieder der Stäbchen sind Cylinder mit kreisförmigem bis elliptischem Querschnitte und oft canelirter Oberfläche, deren äusseres Ende eine unregelmässige, zuweilen wie benagt aussehende, oder treppenförmige Kuppe besitzt; die der Zapfen sind Kegel mit glatter, leicht abgerundeter Spitze. Letztere sind weicher, biegsamer, vergänglicher, von schwächerer Lichtbrechung und fallen leichter von den Innengliedern ab. Cylinder und Kegel werden nach dem Tode deutlicher quergestreift und blättern im Innern zu Säulen von Plättchen oder Ringen mit unregelmässigem Lumen auf. Die Plättchen der Kegel sind die dickeren. In Osmiumsäure werden die Cylinder bedeutend dunkler, als die Kegel.

Die Aussenglieder aller Sehzellen bestehen aus einer Mantelschicht, Rinde oder Haut und aus dem von Plättchen und Zwischensubstanz gebildeten Inhalte; dies wurde von M. Schultze namentlich bei den Kegeln, wo die Haut auch die Spitze continuirlich überzieht, festgestellt. Auf die chemische Structur konnten bis heute nur die Cylinder untersucht werden..

1) Chemische Structur der Cylinder.

Die Hülle der Stäbchenaussenglieder ist isolirbar und verhält sich wie Neurokeratin.[1] In absoluten Alkohol gelegte, darauf mit Aether, endlich mit kochendem Alkohol extrahirte Froschnetzhäute zeigen die Cylinder in Gestalt sehr reducirter, runzeliger Fortsätze, die sich mikrochemisch wie geronnenes Eiweiss verhalten, kaum quellungsfähig sind und jeder auffälligeren Reaction gegen Osmiumsäure entbehren. Verdauungsversuche daran lehren, dass dieser Rest nach Art der geronnenen Albumine löslich wird, aber nur zum Theil, so dass nach abermaliger starker Volumsabnahme ein schwer zerstörbarer, nur durch ätzende Alkalien und concentrirte Schwefelsäure bei Siedehitze schneller schwindender Antheil übrig bleibt. Auch die wirksamste, lange durchgeführte Verdauung erst mit Pepsin und HCl, dann mit Trypsin, nach einander in salicylsaurer, neutraler und schwach alkalischer Lösung beseitigt dieses Residuum nicht, das auch langer Bacterienfäulniss widersteht. Das Keratin der Cylinder wetteifert an Unlöslichkeit mit dem des Gehirns. Wie Morochowetz[2] fand, ist nicht alles Keratin für wochenlang, namentlich mit Magensaft durchgeführte Verdauung unzugänglich, das der Haare und der menschlichen Epidermis besonders nicht. Hiermit und mit dem

1 Vgl. Kuhnt a. a. O.
2 Nach nicht publicirter Mittheilung.

Neurokeratin der grauen Netzhautsubstanz verglichen, erscheint das Stäbchenkeratin ausserordentlich resistent, etwa nur dem Keratin käuflichen Horns nachstehend. Um es frei von Nucleïnen, die es noch zurückhalten könnte, zu erhalten, empfiehlt es sich die Verdauung wie gewöhnlich, in alkalischer Lösung zu beenden; es macht aber nicht den Eindruck, als ob beim Uebergange von der neutralen Trypsinverdauung zur alkalischen noch eine Aenderung im Aussehen der Stäbchenreste erfolge, ebensowenig, wenn dieselben mit kalter Kalilauge von 1—5 pCt. einige Stunden behandelt werden. Man wäre versucht die den genannten Lösungsmitteln trotzenden Rückstände für thierische Cellulose zu nehmen, wenn nicht beim Neurokeratin des Gehirnes und der Nerven der Nachweis des Gehaltes an Schwefel (3 pCt.) und an Stickstoff vorläge [1], und wenn nicht auch an den Stäbchenresten alle Cellulosereactionen fehlschlügen, während die Gelbfärbung mit heisser Salpetersäure und die Röthung mit dem Millon-schen Reagens sehr gut gelingen. Mikroskopisch stellen sich die Keratinreste der Cylinder als glänzende, stark lichtbrechende, gerunzelte Fransen dar, deren viele jedoch deutlich röhrenförmigen Bau erkennen lassen. Ob dieselben an einem oder an beiden Enden offen sind ist schwer zu entscheiden, sie scheinen aber in Präparaten, deren Zusammenhang mit dem Keratin vorderer Netzhautschichten erhalten geblieben, nach Kuhnt's [2] Beobachtungen in zartere, den Innengliedern angehörige Hüllen überzugehen, welche wahrscheinlich im Zusammenhange mit der M. limitans ext. stehen. Damit würde das Stäbchen an seinem äusseren Theile zu einer Neurokeratinröhre, welche nach vorn Protoplasma des Innengliedes, nach hinten dessen zur Säule ausgewachsene Cuticularsubstanzen des Aussengliedes umfasst, eine Auffassung, welcher auch einige später zu erörternde Erscheinungen günstig sind.

Der Inhalt der Cylinder wird augenscheinlich aus zwei Formbestandtheilen gebildet, aus den Plättchen und aus deren Zwischen- oder Kittsubstanz, doch scheinen dieselben in der chemischen Structur wenig verschieden zu sein, besonders im Leben, oder im Ueberlebenszustande, wo auch die quere Streifung nicht oder kaum angedeutet ist. Die schon erwähnte successive Extraction der Cylinder lehrt, dass ihr Inhalt in zwei Gruppen von Stoffen zerfällt, von welchen die eine der Alkohol-Aetherbehandlung weichende, als myelogene, die andere als albuminöse zu bezeichnen ist; es finden sich aber keine Gründe je eine nur den Plättchen oder nur dem Kitte zuzu-

1 Verhandl. d. naturhist. med. Ver. z. Heidelberg 1876. I. 5. Heft.
2 Kuhnt a. a. O.

schreiben, um so weniger, als es sehr möglich ist, dass gewisse Bestandtheile der beiden Gruppen erst aus chemischer Spaltung eines einzigen präexistenten Körpers hervorgehen.

Das *Stäbchenmyeloïd*. Die von M. Schultze und Rudneff[1] an den Cylindern gefundene Färbung durch Osmiumsäure erinnert wegen ihres schnellen Auftretens und wegen ihrer Tiefe am meisten an das von Schultze gefundene Verhalten des Fettes und des Nervenmarkes gegen dasselbe Reagens; sie unterscheidet sich jedoch durch die Nuance; Fett wird in OsO_4 gelbbraun bis rothbraun, endlich rein schwarz, Nervenmark blaugrau bis blauschwarz, während die Stäbchenaussenglieder darin stets grünbraun, höchstens grünschwarz werden, Nuancen, welche an keinem andern Bestandtheile des Thierkörpers, mit Ausnahme der Myeloïdkörner des retinalen Epithels, wo sie in helleren Schattirungen auftreten, durch OsO_4 erzeugt werden. Ohne mit der Bezeichnung „Myeloïd" bereits einen chemischen Körper bezeichnen zu wollen, was ebenso unzulässig wäre, wie wenn man dem Worte Myelin oder Nervenmark einen bestimmten chemischen Begriff unterlegte, soll mit dem Worte nur die auf die genannte Weise gegen OsO_4 reagirende Mischung chemischer Körper bezeichnet werden. Hängt die Intensität der grünbraunen Färbung mit der Menge oder mit der Verdünnung des Myeloïds durch andere Substanzen zusammen, so sind die Cylinder als myeloïdreich, die auf OsO_4 viel schwächer reagirenden Kegel der Zapfen und viele dem Froschpräparate in dieser Reaction sehr nachstehende Cylinder von Stäbchen der Säuger für myeloïdarm zu erachten. Die Myeloïdkörner des retinalen Epithels müssen aus gleichem Grunde myeloïdarm heissen.

So wenig wie von dem Myelin des Nervenmarkes gelingt es vom Myeloïd Lösungen zu erhalten, welche direkt oder nach dem Verdunsten genau so reagirten, wie die präexistente Mischung. Es ist zwar ein Leichtes, Alkohol-Aetherextrakte aus Nerven oder Netzhäuten zu gewinnen, deren Verdunstungsrückstand sich mit OsO_4 sehr dunkel färbt, aber es gelingt nicht im einen Falle die grünbraune, im andern die blauschwarze Farbe zu erhalten, sondern es wird nur eine braune erzielt, wie von Fetten oder mit Oelsäure. Dennoch wird Nerven und Stäbchencylindern durch jene Extraction Alles geraubt, was ihr Verhalten zu dem färbenden Reagens bedingt.

Nervenmark giebt an Aether bekanntlich Lecithin, an heissen Alkohol Cerebrin ab, zwei wohl definirte chemische Körper,

3 M. Schultze's Arch. f. microscop. Anat. I. S. 300.

welche aber von OsO_4 gar nicht gefärbt werden. Ebenso indifferent verhält sich Das, was aus der Netzhaut durch dieselben Mittel einigermaassen sauber abzuscheiden ist. Das Aetherextrakt von Ochsennetzhäuten giebt stark abgekühlt eine schwache, schnell auf dem Filter zu sammelnde Trübung, die vermuthlich aus Lecithin besteht und sich mit OsO_4 gar nicht färbt, und wenn man die mit Aether erschöpften Netzhäute mit Benzol oder mit siedendem Alkohol auszieht, bekommt man eine zweite, sich leicht vor beendeter Verdunstung rein weiss ausscheidende Substanz von dem Verhalten des Cerebrins, welche nach dem Kochen mit Schwefelsäure aus alkalischen Kupferlösungen in der Wärme Oxydul ausscheidet; auch dieses Cerebrin reducirt OsO_4 nicht. Die durch jene Säure geschwärzten Stoffe sind demnach unter den in Aether löslichen, nach Ausscheidung des Lecithins übrig bleibenden, sehr an Fette erinnernden Substanzen zu suchen, welche wahrscheinlich die im Leben aus dem Lecithin entstehenden Fettsäuren sind. Doch sind dieselben an ihrem natürlichen Standorte wohl combinirt mit irgend etwas Anderem zu denken, von dem das Lösungsmittel sie trennt, und welches die Nuancen der Färbung bedingt, wenn der eine Bestandtheil die OsO_4 reducirt. Es liegt nahe hier an Albumine zu denken, die im Nervenmarke anscheinend in noch grösserer Menge vorkommen, als in den Stäbchencylindern. Da verschiedene Lecithine mit Recht angenommen werden, weil dieselben nach dem Fundorte wechselnde Mengen von Palmitinsäure, Stearinsäure und Oelsäure, neben dem Cholin und der Glycerinphosphorsäure bei der Zersetzung liefern, so können Myelin und Myeloïd, deren Verhalten gewiss auf der Gegenwart einzelner jener Lecithinabkömmlinge beruht, sich in den Nuancen der OsO_4-Färbung vielleicht nur deshalb unterscheiden, weil an ihrem Standorte das eine oder das andere Lecithin Verwendung fand.

Die Cylinder der Froschnetzhaut sind nicht alle gleich myeloïdhaltig, einzelne sind in ganzer Ausdehnung, andere partiell arm daran, manche so arm wie die Myeloïdkörner der Epithelzellen. Man sieht dies an Präparaten abgeschüttelter Cylinder, die lange in grossem Ueberschusse von einprocentiger OsO_4 gelegen, unter welchen es immer manche von auffallend blasser Farbe, viele von partieller heller Olivenfärbung giebt. Bemerkenswerther Weise wird die letztere niemals in der Mitte der Cylinderlänge, sondern ausschliesslich an einem Ende gefunden, das sich da, wo vorn und hinten durch das anhaftende Innenglied zu unterscheiden sind, ausnahmslos als das periphere, in die Basis der Epithelzellen reichende erweist.

Wenn der Cylinderinhalt in Plättchen zerfallen ist, sieht man

diese sowohl, wie ihre Zwischensubstanz an der Färbung durch OsO_4 Theil nehmen; es muss daher beiden Myeloïd zugeschrieben werden. Wahrscheinlich sind die Plättchen besonders reich an Cerebrin, denn sie sind es, die nach vorgängiger Aetherbehandlung noch kenntlich, am meisten durch kochenden Alkohol oder Benzol schwinden. Indess bleibt auch dann noch etwas in den runzeligen Troddeln übrig, welche die Cylinder vor der Extraction durch Verdauung darstellen, was auf Reste der Plättchenstructur zu deuten scheint.

Seit M. Schultze's Untersuchungen sind noch manche sowohl auf Eiweissstoffe, wie auf Myeloïd in den Cylindern deutende Reactionen bekannt, so die erstaunliche Quellung in verdünntem Aetzkali, die alle Structur daran unkenntlich macht. In concentrirten Harnstofflösungen quellen sie ebenfalls und backen darauf zu grossen durchsichtigen Klumpen zusammen; ähnlich wirkt rasches Gefrieren und Wiederaufthauen. Am überraschendsten ist ihr Verhalten zur Galle (glyco- oder taurocholsaurem und cholalsaurem Alkali), von 1—5 pCt., worin sich die Cylinder und Kegel aller Sehzellen sämmtlicher Thiere leicht auflösen, unter Hinterlassung leerer, dünnwandiger Scheiden. Hierin stimmt der Inhalt der Aussenglieder bemerkenswerther Weise mit dem Nervenmarke, mit vielen Blutkörperchen, mit dem Protoplasma des retinalen Epithelzellen und deren Myeloïdkörnern, sowie mit den Axencylindern markhaltiger Nerven überein und zwar wohl deshalb, weil die Galle ein Mittel ist, das ausser genuinen, selbst festen Albuminen, leicht Lecithin und Cerebrin auflöst, oder ein Medium, welches die sich sonst gegenseitig ausschliessenden Behandlungen mit wässrigen und alkoholisch-ätherischen Extractionsflüssigkeiten, in Einem ersetzt. Sehr eiweissreiche Elementarorganismen werden nach bekannten Erfahrungen nicht von Galle gelöst, vermuthlich weil diese (die meisten Epithelien) ausser den genuinen Albuminen, schwerer lösliches, umgewandeltes enthalten, das ihnen den Halt giebt, welche albuminärmere (Blutkörperchen z. B.) in den für wässrige Flüssigkeiten kaum angreifbaren, myelogenen Stoffen finden dass die letztere Art in den Nerven und Sinnesepithelien überwiegt, kann mit der rapiden chemischen Veränderlichkeit, die wir Allem, was nervös ist, zuschreiben müssen, zusammenhängen.

Die Auflösung der Cylinder durch Galle stellt sich unter dem Mikroskope, bei hinreichender Frische der Netzhaut, fast explosionsartig dar: es ist ein Zerplatzen der Aussenglieder, das die ganze Membran von der Stelle rücken kann, von einer Plötzlichkeit, mit welcher nur das Schwinden der meisten Säugerblutkörperchen und die Zerstörung retinaler Epithelzellen, unter Fortstieben der Fuscintheilchen in demselben Medium vergleichbar ist. An einzeln schwimmenden Stäbchen ist der Vorgang am

besten zu erkennen, indem man ihn in Präparaten verschiedener Ueberlebenszeit verfolgt, da er sich nach dem Tode immer langsamer abwickelt. Man sieht da die zunächst ganz unveränderten Cylinder, an irgend einer Stelle schwer zu beschreibende Aenderungen der Lichtbrechung erleiden, welchen ein plötzliches Auftreten sehr deutlicher Querstreifung unmittelbar folgt; darauf tritt in den Plättchen ein durch den ganzen Cylinder reichender, centraler, mit Ausbuchtungen versehener Canal auf; die Querstreifen werden ungemein breit, verschwinden wieder und es hinterbleibt von den Stäbchen anscheinend nichts. Sobald die Galle durch Salzlösung ersetzt ist, findet man aber ausser wenigen gequollenen Klümpchen, röhrenförmige Reste der Cylinder, deren mit dem Keratin übereinstimmendes Verhalten durch die Resistenz gegen kalte Kalilösung und gegen eine auf dem Objectträger im feuchten Raume vorzunehmende Trypsin- oder Pepsinverdaunng festzustellen ist. Während des Ablaufes der Veränderungen im Innern erleiden die Cylinder natürlich entsprechende Aenderungen der Grösse: sie werden dicker und bedeutend länger; dabei krümmen sie sich zuerst, ehe sie sich wieder strecken. Ist die Netzhaut frisch genug und tritt die Galle auf einmal rasch und hinreichend concentrirt hinzu, so verlaufen die genannten Erscheinungen in einem Augenblicke, wie wenn der Cylinder eine mit Münzen gefüllte, platzende Rakete wäre. An abgestorbenen Netzhäuten erzeugt die Galle langsame Quellung der Cylinder, schliesslich scheinbar auch Lösung; es sind aber durch Salzzusätze später so viele klumpige Reste sichtbar zu machen, dass nur Auflösung eines Theiles der den Inhalt zusammensetzenden chemischen Körper anzunehmen ist. Unter den alsdann nicht gelösten Stoffen findet sich einer, von dem der Wandel der Löslichkeit besonders scharf, wie in dem Folgenden gezeigt wird, festzustellen ist.

2. *Farbstoffe der Sehzellen.*

In den Sehzellen sind Pigmente seit den Untersuchungen Hannover's[1] über die Retina der Reptilien und Vögel bekannt; sie finden sich da in den Oelkugeln der Zapfen, welche genau an der Grenze des Innen- und Aussengliedes liegen. Die Farben repräsentiren die ganze Scala des Spectrums und erreichen mit Ausnahme des Blau grosse Sättigung; ausserdem kommt eine aus Spektralfarben nur durch Mischung zu erhaltende vor: Purpur. Vorzugsweise verbreitet sind die Purpurfarbe und die das Spectrum vom rothen Ende bis zum Grün einnehmenden Farben. Wegen der ziemlich gleichmässigen Ausstreuung der verschiedenfarbigen Oelkugeln erscheint die Vogelnetzhaut mikroskopisch, meist wohl schmutzig und zweifelhaft nuancirt, so dass der Anblick auf die Fläche wenig von der Pracht und Mannigfaltigkeit der kleinsten Setzstücke ihrer Mosaik ahnen lässt; nur wo eine Farbe sehr überwiegt, sieht die ganze Netzhaut gelb, gelbgrün oder schön roth

1 A. Hannover, Arch. f. Anat. u. Physiol. 1840. S. 320.

aus. Ausser bei den Vögeln findet sich gefärbtes Fett in den Zapfen vieler Reptilien, deren Netzhaut in diesem Falle gelb aussieht, da hier nur diese Farbe die Regel ist; allein die Schildkröten besitzen nach M. SCHULTZE [1] auch rothe Oelkugeln. Im Auge vieler Wirbellosen ist ein schön carminrothes Pigment seit lange bekannt, doch beschrieb erst 1839 KROHN [2] die seitdem vielfach bestätigte, schöne Rosenfarbe der Stäbchen von Cephalopoden; ähnliche rosa oder violette Färbungen wurden nach und nach an den Sehstäben anderer Evertebraten, bei den Insecten besonders von LEYDIG, bei den Krebsen von M. SCHULTZE beschrieben.

Bei Wirbelthieren, wo man bis dahin nur farbige Zapfen kannte, sah HEINRICH MÜLLER [3] zuerst, dass die Stäbchen des Frosches zuweilen roth seien. LEYDIG [4] verallgemeinerte dies für die Amphibien und fand, dass die frische Retina des Frosches dem blossen Auge lebhaft rothen Atlasschiller zeige; er bezeichnete die Farbe zuerst als rosenroth, worin ihm M. SCHULTZE [5] folgte, der die Färbung ausser beim Frosche, bei einem Säuger, der Ratte, und in den Stäbchen der Eule bemerkte. Trotz dieser merkwürdigen, von Vielen vergessenen oder ignorirten Angaben ist mit grösster Bestimmtheit zu behaupten, dass wenn man vor dem Jahre 1876 irgend einen Biologen, mit Ausnahme der eben genannten oder der intimeren Schüler M. SCHULTZE's gefragt hätte, wie die Stäbchen der Wirbelthiere aussähen, man die Antwort erhalten hätte: farblos, glänzend u. s. w.

Erst BOLL [6] lenkte die allgemeine Aufmerksamkeit auf das verbreitete und constante Vorkommen farbiger Stäbchen und entdeckte in der Retina des Frosches auch grüne Stäbchen. Was diesen Beobachtungen besonderen Werth und das grösste Interesse verleihen musste, war aber die weitere Entdeckung BOLL's, dass im Hellen gehaltene Frösche blassere, durch directes Sonnenlicht länger geblendete, völlig farblose Retina zeigen und die Angabe, dass die Farbe sich in der herausgenommenen Froschnetzhaut kaum eine Minute halte, beim Säugethiere schon im Auge einige Augenblicke nach dem Tode vergehe. Eine ohne Frage äusserst wichtige Beziehung der Retinafärbung zum Lichte war damit constatirt, deren Bedeutung durch die Angabe, dass die Färbung sich bei geblendeten Fröschen in der Dunkelheit alsbald

1 M. SCHULTZE, Artikel Retina in Stricker's Handb. d. microscop. Anat. und HANNOVER a. a. O.
2 A. KROHN, Verhandl. d. Leopold. Car. Acad. XIX. 2. S. 45. 1842.
3 H. MÜLLER, Ztschr. f. wissensch. Zool. III. S. 234—237. 1851 u. VIII. S. 1—122.
4 FR. LEYDIG, Lehrb. d. Histologie 1857. S. 238 u. 239.
5 M. SCHULTZE, Arch. f. microscop. Anat. II. S. 199 u. 208.
6 FR. BOLL, Monatsber. d. Berliner Acad. 12. Nov. und Accad. d. Lincei. 3. Dec. 1876.

wiederherstelle, nur erhöht werden konnte. Um sich von dem Thatsächlichen zu überzeugen, schrieb Boll vor, das Auge so schleunig wie möglich am Kopfe des Frosches zu halbiren und die Retina unter Vermeidung von Druck, welcher ebenso wie das Absterben die Farbe vernichte, sogleich mit blossem Auge oder mikroskopisch zu besehen, bei Säugern dagegen im Momente des Chloroformtodes die Netzhaut mit dem Augenspiegel zu betrachten, wo man die rothe Farbe des Augengrundes plötzlich verschwinden sehe. Beim Menschen sei daher der Tod durch den Augenspiegel zu constatiren. Eine in der Thiereihe auf die angegebene Weise vorgenommene Umschau veranlasste Boll die „Purpurfarbe“ als welche er die „Eigenfarbe“ der Netzhaut bezeichnete, der „plättchenstructurirten Substanz der Stäbchen und Zapfen“ sämmtlicher Thiere, vielleicht mit Ausnahme der Reptilien, deren Zapfenaussenglieder sehr klein sind, zuzuschreiben. Ob die Färbung von Interferenz oder von einem Farbstoffe herrühre, blieb unter Erinnerung an die bei den Plättchensäulen sehr denkbare Erscheinung der Farben dünner Blättchen unentschieden.

So grosse Hoffnungen diese Befunde erwecken mussten, so gering war die Aussicht über dieselben hinauszukommen bei einem Objecte, das sich unter der Hand in wenigen Augenblicken der weiteren Bearbeitung der Art entzog, wie die Farbe der Retina. Indess hatte eine solche Structur oder eine solche Substanz, welche, nachdem wir ihr kaum genaht, sogleich aufhörte zu sein, was sie gewesen, in der wundersam empfindlichen Netzhaut die grösste Wahrscheinlichkeit für sich. Man brauchte sich nur der von du Bois-Reymond und von L. Hermann studirten, erstaunlich geringfügigen Einwirkungen zu erinnern, durch welche an dem gewiss ungleich weniger alterablen Muskelgewebe die mächtigsten Einflüsse auf dessen electromotorisches Verhalten ausgeübt werden, um ein Beispiel für die jähen, materiellen Veränderungen leicht erregbarer, thierischer Gebilde nach minimalen Eingriffen in ihre natürliche Anordnung zu finden. Dass die Stäbchenfarbe der Wirbellosen solche Grade der Empfindlichkeit gegen das Absterben nicht zeige, war freilich lange bemerkt, sprach aber erst recht für Boll's Darstellung, weil die Elementarorganismen niederer Geschöpfe nach geläufigen Erfahrungen im Allgemeinen selbständigere Existenz besitzen und vom Gesammtorganismus getrennt, viel langsamer absterben, als die der höheren Thiere. Erwog man endlich die empfindliche Reaction des Auges und der Retina gegen alle möglichen Reize ausser dem Lichte, und die starken Sehempfindungen, welche derartige Insulte uns bereiten, so lag der Gedanke nahe, dass die Stäbchenfarbe im Leben auch durch diese ver-

gehe, im Tode durch das Aufhören der Ernährung und Athmung schwinden werde und mit grösster Rapidität nach dem Herauszerren der hochempfindlichen Membran aus dem Auge, welches sie in sich selbst, am gefährlichsten Orte beim Abheben vom Epithel, spaltet, vernichtet werden müsse.

Indess nahm der Gegenstand sogleich nach BOLL's Mittheilungen eine andere Wendung. Von FR. HOLMGREN's[1] schönen Beobachtungen über die stundenlang bemerkliche Veränderlichkeit des electromotorischen Verhaltens eines isolirten und halbirten Froschauges auf Licht und Dunkelheit ausgehend, fand ich den eben erörterten Gedankengang, welcher der Aufnahme von BOLL's thatsächlichen Angaben zu Grunde gelegen, unwahrscheinlich, und ein Versuch belehrte mich sofort, dass auch die an der Epithelverbindung aufgerissene Froschnetzhaut in einem möglichst schwach erleuchteten Raume (ich hatte ein kopfgrosses Loch im geschlossenen Fensterladen mit gelbem Papier bespannt) ihre Farbe stundenlang bewahrt, sie aber an gutem Tageslichte sogleich verliert. Da der Versuch mit im Dunkeln gefaulten, mit zerquetschten und wieder zusammengeschabten Netzhäuten, mit in NH_3 erweichten oder in Alaun gehärteten in gleicher Weise gelang, war jeder Einfluss des Absterbens auf die Retinafarbe widerlegt, das Licht als die alleinige Ursache ihres Abblassens und Schwindens erkannt, wie es nach partieller Belichtung erhaltene, photographische Bilder überdies schlagend bewiesen, und die Unabhängigkeit der Stäbchenfarbe von allen Structurverhältnissen dargethan. Es blieb jetzt nur eine Annahme übrig: die Stäbchen enthalten einen Farbstoff, einen Sehpurpur; dieser wird durch Licht zersetzt: es giebt eine rapide photochemische Wirkung in der Netzhaut.[2]

A) Der Sehpurpur.

(Rhodopsin.)

Beobachtungsmethode. Die Gegenwart des Sehpurpurs wird zunächst an der dem blossen Auge kenntlichen Farbe der isolirten Netzhaut constatirt. In zweifelhaften Fällen und wenn die Vertheilung in einer Netzhaut zu untersuchen ist, wird die Retina möglichst frisch, vom Epithel befreit, mit der Rückfläche gegen ein sehr grosses, hohl aufgelegtes Deckglas geklebt, und unter Schutz vor Verdunstung, bei gerade hinreichendem Tageslichte, mikroskopisch betrachtet, wobei starke Vergrösserung nicht ausgeschlossen, zuweilen

1 FR. HOLMGREN, Upsala Läkareförenings Förhandlingar 1871.

2 W. KÜHNE, Zur Photochemie der Netzhaut a. a. O. I. S. 1. 5. Jan. 1877.

nöthig ist. In Uebereinstimmung mit Boll's Beobachtungen ist auf Verwendung aus dem Dunkeln kommender Thiere zu halten, obwohl in mässigem Lichte befindliche Frösche, welche in geschlossenen, direktem Sonnenscheine unzugänglichen Räumen verweilten, auch brauchbar sind. Um maximale Färbung zu finden, sollen die Frösche 1—2 Stunden im Dunkeln verweilt haben. Beim Präpariren der Augen und Netzhäute ist Eile ganz ausgeschlossen, da dasselbe nur vor solchem Lichte geschieht, welches die Stäbchenfarbe erst nach Stunden afficirt. Jeder vor Tageslicht geschützte Raum genügt um darin jene gelbe, mittelst der Natronflamme erhaltene, fast monochromatische Beleuchtung herzustellen. Die Flamme des Bunsen'schen Brenners wird mit 2 an sehr feine Platindräthe angeschmolzene Sodaperlen, die 15—30 Minuten aushalten (nicht mit dem zu flüchtigen Na Cl) versehen, um für die feinsten Präparationen auf 50 Ctm. Entfernung, bei gutem Gasdrucke mehr als genügend Licht zu gewinnen.

Die Retina der Frösche ist aus dem im Aequator halbirten Auge sehr leicht herauszuziehen, nachdem der Opticusansatz hinten an der Sclera abgeknipst worden, bei richtiger Ausführung mit unversehrter Papille. Augen von Säugethieren werden nach dem Ausstürzen des Glaskörpers in einen tiefen mit 0,6 pCt. Na Cl-Lösung gefüllten Teller gebracht, auf dessen Boden ein Stück Bleiplatte liegt. Indem man die hintere Augenhälfte mit dem Opticus gegen das Blei legt und von vorn so mit einem Locheisen gegen die Papille im Augengrunde drückt, dass die Netzhaut ringsum sicher bis zur Uvea durchschnitten wird, trennt man sie von der einzigen Haftstelle; sie ist dann oft leicht mit Hakenpincetten vom Aequator her als flottirendes Häutchen abzulösen. Der Grund des Vogelauges wird am besten vom Rande her durch 2 hart neben dem Pecten verlaufende Scheerenschnitte, die sich an dessen centralem Ende treffen, vorbereitet. Menschliche Augen sind gleich nach dem Tode oder nach der Enucleation bis zur Ankunft am Untersuchungsorte in Eis zu conserviren, worauf sie nach mehr als 24 stündigem Aufenthalte noch sehr brauchbar sind. Ist die Netzhaut ohne Zerstörung von ihrem Epithelium nicht zu lockern, wie z. B. häufig beim Affen, trotz Dunkelaufenthalt und vollkommener Frische, so wird das schon halbirte und des Glaskörpers beraubte Auge 24 Stunden in Kalialaun von 4 pCt. geworfen, ein Verfahren das immer zum Ziele führt. Der vordere Abschnitt der Netzhaut ist durch einfaches Ziehen unter Salzwasser, meist im Zusammenhange mit der Zonula Zinnii und der Linse vollkommen isolirbar.

1) Vorkommen und Verbreitung des Sehpurpurs.

Wenige Ausnahmen abgerechnet kommt der Sehpurpur in allen stäbchenführenden Netzhäuten der Vertebraten, von Petromyzon bis zum Menschen vor. Ausnahmen wurden beobachtet bei einer Fledermaus (Rhinolophus hipposideros), und bei manchen Tagvögeln (Hühnern und Tauben). Petromyzon hat sehr schwach purpurfarbene Netzhaut, ebenso Triton, welchem nach M. Schultze nur eigenthümliche, den Stäbchen- und Zapfenbau vereinigende Uebergangsformen von Sehzellen zukommen. Fuchs und Welponer[1] Schenk und Zuckerkandl[2] entdeckten die Purpurfärbung der menschlichen Retina, nachdem ich die Unzerstörbarkeit der Netzhautfarbe durch Absterben auch bei den Säugern constatirt und die Methode der Natronbelichtung eingeführt hatte. Die Ersteren fanden auch, dass 9- und 7monatliche menschliche Foeten, deren Auge niemals Licht empfangen, purpurne Netzhäute besitzen. Ich fand dasselbe bei einem Rindsfoetus von 65 Ctm., während ich bei neugebornen Kaninchen, die nach M. Schultze nur Andeutungen der Cylinder an den Stäbchen besitzen, die Netzhaut noch ungefärbt sah. In einem lebenswarmen, völlig normalen, dunkel gehaltenen menschlichen Auge, das O. Becker enucleïrt hatte, fand ich die Netzhaut von schön violettpurpurner Farbe, am Lichte schnell zu hellem Lila ausbleichend.

Michel und Rosenthal[3], die ein ebensolches Auge untersuchten, geben an die Netzhaut farblos gefunden zu haben, doch sind sie wahrscheinlich Opfer ihres Irrthums, dass die Netzhautfarbe reinroth, nicht, purpurn sei, geworden, der sie verhinderte statt des beim Abblassen fälschlich erwarteten Gelb, das helle Lila zu erkennen.

Sehpurpur ist enthalten in der Netzhaut aller darauf untersuchten, auch der das Dunkle liebenden Thiere, beim Dachs, bei der Ratte und bei albinotischen Kaninchen, beim Aal und bei allen Eulen sogar in besonders grosser Menge, ferner bei den Raubvögeln, bei den Knochenfischen und bei den Knorpelfischen, wo die Farbe zuerst von Boll gefunden wurde.[4] Dagegen ist bis heute bei den Wirbellosen, trotz zahlreicher Bemühungen, niemals ein Auge mit Sehpurpur gefunden; wie später bewiesen wird, rühren die Purpurfärbungen dort von ganz anderen, im Lichte sehr langsam vergänglichen Pigmenten her.

Stäbchencylinder ohne Purpur finden sich in der Nähe der Ora serrata des Menschen und des Affen (und wol am gleichen Orte noch

1 Fuchs und Welponer, Wiener med. Wochenschr. 1877. S. 221.
2 Schenk und Zuckerkandl, Allgem. Wiener med. Ztg. 13. März. 1877.
3 Michel, Centralbl. f. d. med. Wiss. 1877. No. 24.
4 Boll, Monatsber. d. Berliner Acad. l. c.

bei vielen anderen Thieren), so dass eine 3—4 mm. breite nach aussen etwas schmälere, farblose Zone die Netzhaut vorn begrenzt.[1] In menschlichen Augen scheinen auch die im Umkreise der Fovea centralis in der Macula lutea spärlich zwischen den Zapfen stehenden Stäbchen purpurfrei zu sein. In der Netzhaut des Kaninchens, des Ochsen, des Schafes, ausgewachsener Hunde und der Katze findet sich ein den Horizont einnehmender, mehr minder breiter, nach oben deutlicher als nach unten abgegrenzter, purpurreicherer Streif, der beim Kaninchen eine deutlich erhobene „Sehleiste", bei andern Thieren mehr einen flachen „Sehgürtel" darstellt; es ist noch nicht genügend untersucht, ob dieses Gebilde von purpurreicheren, oder nur von längeren Cylindern und Stäbchen herrührt.

Die Purpurfarbe neigt bei einzelnen Thieren mehr zum Violet als bei anderen, am stärksten bei den Eulen (besonders bei Nyctaëtos lacteus), bei den meisten Fischen (auch beim Aal), unter den Säugern beim Hammel und beim Menschen.

Das Vorkommen des Sehpurpurs ist überall auf die Stäbchencylinder beschränkt; Zapfenaussenglieder sind niemals gefärbt. Je reicher an Zapfen eine Netzhaut im Ganzen oder stellenweise ist, desto purpurärmer ist sie. Die stäbchenfreie Reptiliennetzhaut enthält keinen Sehpurpur, und es ist die Retina der Schlangen, welche auch kein gelbes Zapfenpigment enthält, ohne Epithel, vollkommen farblos. In den zapfenreichen Netzhäuten der Fische und Tagraubvögel tritt der Sehpurpur sehr zurück: die Purpurfarbe zeigt sich dort mussivisch oder streifig unterbrochen. Beim Menschen fand ich die nur Zapfen enthaltende fovea centralis eines lebenswarm untersuchten normalen Auges, sowie vieler in Eis conservirter Augen von im Dunkeln Verstorbenen völlig farblos und die Purpurfärbung vom Centrum aus in dem Maasse gegen den Aequator zunehmend, wie die Zahl der Zapfen gegen die der Stäbchen abnimmt.

2) Darstellung des Sehpurpurs.[2]

Die Vorschrift nur vor solchem Lichte zu arbeiten, welches die Netzhautfarbe am meisten schont, gilt im erhöhten Maasse für die länger dauernden experimentellen Untersuchungen der retinalen Farbstoffe. Da Froschnetzhäute das hauptsächlich in Betracht kommende Material sind, das im Leben, wie schon angedeutet wurde, ziemlich viel Licht verträgt, könnte die Anforderung übertrieben scheinen; aber es ist hier gleich vorauszuschicken, dass ein Auge, welches ohne

1 W. Kühne a. a. O. I. S. 33 und 107.
2 W. Kühne, Centralbl. f. d. med. Wiss. 1877. S. 194 und a. a. O. S. 42 u. f.

Schädigung bis zum Momente der Exstirpation mässigem Lichte ausgesetzt worden, unmittelbar darauf von demselben Lichte stark an seiner Netzhaut verändert wird, wenn diese abgehoben ist. Vollends gilt dies für mechanisch zerstörte Netzhäute. Das Licht der Natronflamme ist zwar nicht vollkommen unwirksam und kann völligen Lichtabschluss, von welchem immer noch Gebrauch zu machen bleibt, nicht ersetzen, ist aber, wo man etwas sehen muss, das einzig brauchbare, jedem gemischten und noch so abgeschwächten Lichte vorzuziehen und nicht durch das freilich noch weniger wirksame, rothe zu ersetzen, weil letzteres die Unterscheidung des Blutes, welches im monochromatisch gelben Lichte zum Vortheile der Präparationstechnik schwarz wie Tinte aussieht, nicht gestattet.

Das einzige zur Trennung des Sehpurpurs von allen geformten Bestandtheilen gefundene Mittel besteht in der Auflösung frischer Stäbchen durch Galle, oder in den S. 257 genannten, reinen gallensauren Alkalisalzen. Keins von den die Netzhautfarbe erhaltenden Mitteln (vergl. unten S. 283), das dazu ausserdem geeignet scheinen würde, kann die Galle ersetzen. So sehr es z. B. bei der Quellung der Stäbchen in sehr concentrirter Harnstofflösung oder nach wiederholtem Gefrieren und Aufthauen im Dunkeln, was die Netzhautfarbe gar nicht verändert, den Anschein haben kann, als ob die Farbe sich homogen, wie in Lösung verbreite, so bestimmt beweist die Farblosigkeit des Filtrates solcher Massen das Gegentheil.

Die zur Extraction der Netzhäute dienende Gallelösung wird zweckmässig aus farbloser, krystallisirter Ochsengalle erhalten, indem man aus einem Vorrathe dosirter, alkoholischer Lösung die zum jedesmaligen Gebrauche nöthige Menge abmisst und nach vollständiger Entfernung des Alkohols auf dem Wasserbade, aus dem festen Rückstande wässrige Lösungen der gewünschten Concentration, am besten von 2—5 pCt. bereitet. Die wässrige, bekanntlich sehr zersetzliche Lösung durch desinficirende Zusätze vor Fäulniss geschützt, vorräthig zu halten, empfiehlt sich nicht.

Nur die Netzhäute des Frosches, der Kröte, des Salamanders, der Eulen, des Kaninchens und des Pferdes geben hämoglobinfreie Purpurlösungen, die der beiden letzteren, indem man die gefässhaltige Gegend der Opticusausbreitung fortlässt; bei den andern genannten scheint der Blutgehalt, in Ansehung der schwereren Löslichkeit kernhaltiger Blutkörperchen durch Galle, zu klein zu sein um schaden zu können, abgesehen davon, dass die allein Gefässe führende M. hyaloïdea der Amphibien sich oft ablöst.

Alle Netzhäute sollen frisch, bei Warmblütern nicht über eine Stunde alt sein, während zuvor isolirte Froschretinae je nach der Temperatur selbst 24 Stunden gelegen haben können. Im Absterben

tritt der schon S. 258 erörterte Punkt ein, wo die Stäbchen durch Galle nur scheinbar vergehen, sich in Wirklichkeit aber nicht vollkommen auflösen, oder nur quellen, worauf sie ganz ungefärbte Filtrate liefern. Hinsichtlich der vorzugsweise in Verwendung kommenden Froschaugen ist zu bemerken, dass ihnen die Netzhaut sogleich nach der Decapitation zu entnehmen ist, wenn dieselbe epithelfrei sein soll.

20—30 Froschnetzhäute werden mit etwa 1 Cub.-Ctm. Galle von 2 pCt. übergossen, eine Stunde unter öfterem Schwenken und Rütteln, wobei heftiges Schütteln durchaus zu vermeiden ist, darin erhalten, weiter einige Stunden zum Absetzen ruhig stehen gelassen und so auf ein möglichst kleines Filter gebracht, dass zunächst die überstehende Lösung abläuft, welche leicht filtrirt. Der schleimig-gallertige Bodensatz giebt den Rest des Flüssigen langsamer ab und wird deshalb nachträglich in das Filter gethan. Man kann sich leicht überzeugen, dass derselbe durch mehrmaliges Auswaschen mit Galle im Dunkeln vollkommen entfärbt wird und die Waschflüssigkeit zur Entscheidung über das Aussehen verdünnter Purpurlösungen benutzen. Um sehr concentrirte Sehpurpurlösungen zu gewinnen, ist es nicht rathsam das Volum der Galle zu vermindern, sondern besser sie concentrirter anzuwenden und das Filtrat rasch im Vacuum einzudicken.

Die Sehpurpurcholatlösungen sind vollkommen klar und je nach Concentration und Herkommen von verschiedener, in Nuance und Tiefe wechselnder Purpurfarbe. Gelegentliche Trübung oder leichte Grade anscheinender Opalescenz, die Verdacht auf Fluorescenz erwecken können, rühren von kleinen Mengen beigemischten Fuscins her, das nach längerer Ruhe vollkommen zu Boden geht. Ans Tageslicht gebracht zeigt die Lösung die schöne Farbe nur einige Augenblicke, indem sie schleunigst roth, darauf gelb, zuletzt farblos wird, wie Wasser.

Im Dunkeln, über Schwefelsäure, im Vacuum verdunstet hinterlässt sie einen Firniss etwa von dem Aussehen ammoniakalischer Carminlösung, in welchem mikroskopisch dunkelviolette, fast schwarze amorphe Partikel neben dunklen Pünktchen unbestimmbarer Farbe zu sehen sind. An feuchter Luft im Dunkeln liegend, zieht das Object so viel Wasser an, dass sich zunächst feuchte Flecken oder Augen darin bilden, von sehr tiefer, stark zum Violett gehender Färbung, während die genannten Partikel sich wieder lösen. Nach dem Bleichen am Lichte ist von den letzteren überhaupt nichts wieder zu finden, was etwaigen Verdacht gegen Fuscinkörnchen widerlegt. Die Purpurcholatlösungen faulen ausserordentlich leicht und bedecken sich

später mit dichten Schimmelrasen, verlieren aber, ebenso wie faulende Netzhäute bei sorgfältigem Lichtschutze nach Monaten nicht an Färbung. Die Fäulniss lässt sich für einige Tage auch bei Sommertemperaturen durch das von Klebs als fäulnisswidrig verwendete Natriumbenzoat verhüten, tritt aber schliesslich immer auf, selbst bei Zusätzen von 2—3 pCt. des Mittels.

In kleinen Dialysoren von vegetabilischem Pergament verliert die Purpurlösung bald alle Galle, welche zum Wasser ohne Spur von Färbung übergeht, während auf der Membran ein tief purpurnes, myelinartiges Magma zurückbleibt, das ebenso empfindlich ist gegen Licht, wie die Netzhaut selbst.[1]

Als unlöslicher Rückstand und frei von myelogenen, collagenen, albuminösen und nucleïnartigen Stoffen kann Sehpurpur, freilich untrennbar an Neurokeratin haftend, dargestellt werden. Zu dem Ende sind abgestorbene Netzhäute, welche Galle nicht mehr färben, verwendbar, indem man die damit vorgängig extrahirte Masse erst mit Wasser, dann mit Essigsäure von 0,5 pCt., und darauf schnell wieder mit Wasser auswäscht, in sehr schwach mit Salicylsäure angesäuerte Trypsinlösung bringt und bei etwa 35 ^{0} C. 24 Stunden verdaut. Der ungelöste Rückstand erst mit NH_3 zur Entfernung von Mucin und Nuclein extrahirt, darauf getrocknet, endlich mit Benzol behandelt, welches Fettresiduen und myelogene Materien fortnimmt, stellt eine kaum mehr veränderliche, in Wasser nicht quellende Masse, von guter Purpurfarbe dar, die im Lichte rasch gelb, darauf allmählich grau wird.

Die wichtige Frage nach der Uebereinstimmung des dargestellten Sehpurpurs mit dem präexistenten macht es nöthig, das ganze optische und chemische Verhalten durch Parallelversuche jeder Art an der Purpurcholatlösung und an der Netzhaut festzustellen. In dem Folgenden wird darum das Verfahren und dessen Resultate für beide Objecte mitgetheilt, nach welchen sich am besten über physiologisch beachtenswerthe Unterschiede und deren Ursache urtheilen lässt. Was in chemischer Hinsicht über den Sehpurpur mitzutheilen ist, kann erst nach Erledigung des optischen Verhaltens erörtert werden.

3) Optische Eigenschaften des Sehpurpurs.[2]

Aussehen. Bei einem am Lichte bleichenden Farbstoffe sind wir im Allgemeinen gewöhnt die Farbe wesentlich durch Abnahme der Sättigung sich ändern zu sehen, und aus den blasseren, vor vollendeter Bleiche auftretenden Nuancen auf die ursprüngliche zu schlies-

1 A. Ewald und W. Kühne a. a. O. S. 454.
2 Vgl. Dieselben a. a. O. I. S. 140 u. f.

sen. Wird ein Körper anders gebleicht, indem er inzwischen die Farbe wechselt, so sagen wir die Farbe verschiesse, wie dies an manchen namentlich mit Mischungen zweier Pigmente verschiedener Echtheit gefärbten Gegenständen zu sehen ist. Die Literatur der Netzhautfarbe ist überreich an Irrthümern, welche dem Vergessen einer so einfachen Sache entsprungen sind, denn nachweislich beruht die verbreitete Annahme einer rothen, betont reinrothen Eigenfarbe der Retina auf der Betrachtung angebleichter, im rothen bis gelben Stadium gefundener Objecte, aus denen fälschlich auf die ursprüngliche und Lebensfarbe zurückgeschlossen wurde. Beim Sehpurpur liegt die Ursache des Verschiessens höchst wahrscheinlich nicht darin, dass er eine Mischung aus echterem rothen und empfindlicherem blauen oder violetten Pigmente darstellt, sondern in der Entstehung eines gelben Zwischenproductes, welches endlich erst in Weiss übergeht. Welches jedoch die Ursache der Umschlagfarben sein möge, so liegt es auf der Hand, dass bei einem durch Licht zersetzlichen Körper das Aussehen im ersten Augenblicke der natürlich möglichst schwach zu nehmenden Belichtung maassgebend ist und dass nicht Lichtbleiche, sondern Verdünnung im Dunkeln das Mittel ist, um zu erfahren, wie die Farbe bei geringer Sättigung aussieht. Um des eigenen Auges bei dieser überaus wichtigen Angelegenheit sicher zu sein, muss dasselbe natürlich von Nachwirkungen vorher gesehener Farben frei sein, also vor Allem den Einfluss der Natronbeleuchtung erst überwunden haben, ehe man an die Betrachtung der davor hergestellten Pigmente im gemeinen Lichte geht.

Sehpurpurlösung wird durch Verdünnen nicht gelb, sondern rosa, stärker verdünnt lila, geht also zu Farben über, welche auf diese Weise niemals aus reinem Roth hervorgehen. Um dem Einwande zu begegnen, dass das Pigment kein Wasser vertrage, braucht die lila Lösung nur wieder im Vacuum concentrirt zu werden um die alte Farbe zurückzugewinnen, die dann im Lichte grade so gelb wird, wie die jeder andern Purpurlösung, welche nicht verdünnt worden. Unschwer lässt sich dies Alles auch am Sehpurpur in situ erkennen, indem man die frische Netzhaut zwischen zwei Glasplatten im Dunkeln zerquetscht und darauf schnell am Lichte besieht: die letzte erkennbare Farbe ist da ebenfalls lila, ihre Vorstufe rosa und es bedarf dazu kaum der Erwähnung, dass im Dunkeln zerquetschte und durch Schaben wieder zusammengehäufelte Retinae nicht anders gefärbt erscheinen, wie unversehrte.

Als eine Eigenthümlichkeit des Purpurs in Lösung sowohl, wie am natürlichen Standorte ist es zu bezeichnen, dass das Violett der Mischung

bei der geringsten und bei der höchsten Concentration oder Schichtendicke am meisten von unserem Auge wahrgenommen wird, während das Roth darin bei mässiger Verdünnung am besten hervortritt; die Stufen sind daher: Purpurviolet, Purpurroth, Carminroth, Rosa, Lila. Purpurreichere oder mit sehr langen Stäbchen (Aal, Eule, Ratte) versehene Retinae neigen am meisten zum Violet, aber es giebt ausserdem noch in der chemischen Natur des präexistenten Farbstoffes begründete Differenzen der Nuancen, welche an die Species gebunden sind, wie aus der ebenfalls besonders zum Violet neigenden Nuance der mit kurzen Cylindern besetzten Netzhaut des Hammels und des Menschen hervorgeht.

Farbenanalyse.[1]

A b s o r p t i o n. Spectroskopische Untersuchung der Netzhaut mittelst der gebräuchlichen Einschaltung des Absorbenten zwischen Spalt und Lichtquelle ist wegen der im Sehfelde des Spectralapparates auftretenden, senkrecht zu den FRAUNHOFER'schen Linien verlaufenden, unregelmässigen Schatten und Streifen ganz unausführbar. Nur der g e l ö s t e Sehpurpur lässt sich in dieser Weise verwenden, indem man ihn in das Fig. 2, in natürlicher Grösse dargestellte, aus Glasplatten zusammengekittete Hohlprisma füllt. Dasselbe ist ein Doppelprisma, dessen eine Hälfte den Farbstoff aufnimmt, während die andere zur Vermeidung von Reflexion und Brechung mit farbloser, gleich brechender Flüssigkeit, in diesem Falle mit Galle von gleicher Concentration oder mit ausgebleichter Purpurlösung gefüllt wird. Indem man die Hohlkeile vor dem Spalt des Spectralapparates verschiebt, können successiv Purpurschichten von 1—14 mm Durchmesser vor die Lichtquelle eingeschaltet werden, deren unverändertes Spectrum zur Controle mittelst des ungeschwärzten Theiles der Grundplatte an der Vorrichtung zur Anschauung kommt. Man beobachtet auf diese Weise, mit steigendem

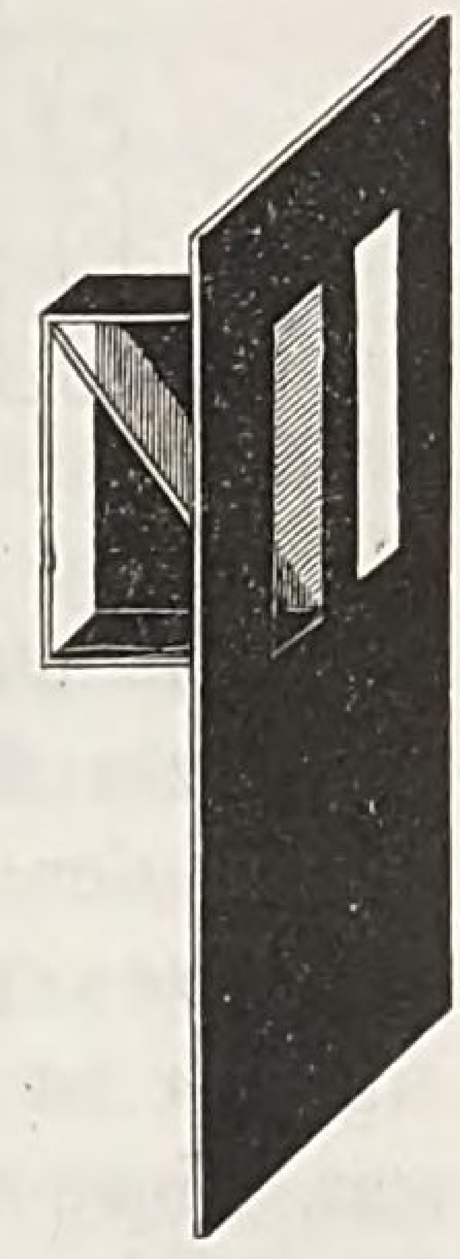


Fig. 2.

Durchmesser der Schicht, Beschattung des Gelbgrün vor *E*, des Grün, Blau, Blauviolet, Gelb und Violet, während *C* des Roth nicht, Orange nur sehr unbedeutend gedämpft scheint. Von *E* bis *G* ist die Absorption immer leicht zu constatiren, während die Beschattung bei *D* und der Durchgang von Violett am andern Ende nur ganz vorübergehend zu bemerken sind. Die Ursache hiervon liegt in der ausserordentlich raschen Farbenänderung der Lösung, die deshalb unvermeidlich ist, weil das violette Spectralende nur bei intensivem Tages- oder

1 Vgl. W. KÜHNE, Centralbl. f. d. med. Wiss. 1877. S. 194 und a. a. O. I. S. 56; sowie A. EWALD und W. KÜHNE, ibid. S. 139—166.

Sonnenlichte zu untersuchen ist, welches fast momentan auf den Purpur im Troge wirkt, selbst wenn das Gefäss ausschliesslich an der Stirnfläche von einem schmalen Strahlenbande aus dem Spalte eines Heliostaten beleuchtet wird. Dafür gewährt das Verfahren den Vortheil die Umwandlung der Farbe während der Wirkung des gemeinen Lichtes unmittelbar spectroskopisch verfolgen zu können. Man sieht dann das Violett sich rasch bedecken, während Orange, Gelb, Gelbgrün, endlich fast das ganze Grün sich aufhellen, so dass das Spectrum wesentlich von *F* an bedeckt bleibt. Endlich wird auch die brechbarere Hälfte frei, indem kurz vor der vollständigen Klärung nur noch ein diffuser Schatten, nahe vor *G* auftaucht; ist dieser auch verschwunden, so ist die Lösung farblos. Fig. 3. *A* und *B* stellen die beiden Anfangsspectra, das des Sehpurpurs und des Sehgelb mit dem Sonnenspectrum dar.

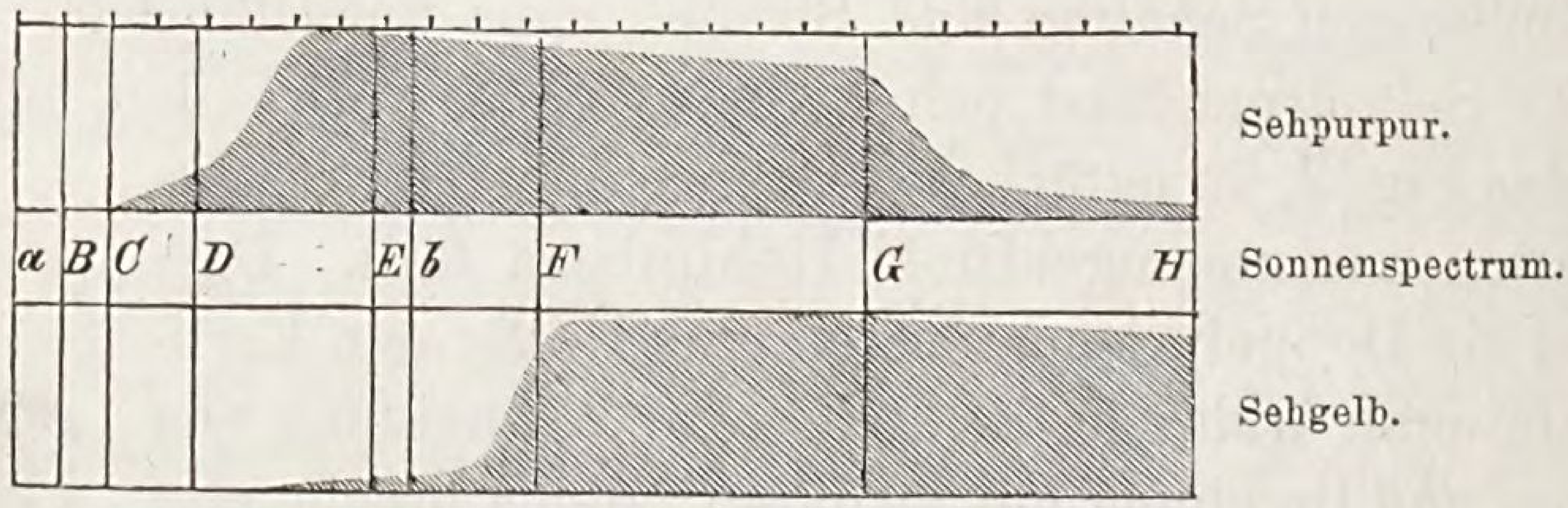


Fig. 3.

Wie man aus den Curven sieht, handelt es sich nur um diffus begrenzte Absorptionen; Absorptionsbänder oder -Streifen entbehren der Purpur und seine farbigen Zersetzungsprodukte durchaus.

Absorption im objectiven Spectrum. Unvergleichlich geeigneter ist das in bekannter Weise, im Dunkelzimmer, mittelst Heliostat, Linse und Prisma objectiv entworfene Spectrum zur genaueren Bestimmung der retinalen Absorption, denn es gewährt dasselbe bei gleicher Deutlichkeit der in den Farben zu beachtenden Verdunklungen den ausserordentlichen Vortheil, wenn es lang genug ist, nirgends Licht von solcher Intensität zu enthalten, dass der Sehpurpur davon zu schnell verändert würde. Ausserdem ist es das einzige Mittel die Netzhaut selbst zu prüfen. Indem man das Spectrum auf einer horizontalen Ebene entwirft und eine dünne Glasplatte hineinschiebt, auf welcher in parallelen Reihen getrennte Tropfen der Purpurlösung von gleicher Grösse mit ebensovielen einzelnen Froschnetzhäuten nebeneinander stehen, überzeugt man sich unmittelbar von der vollkommenen Uebereinstimmung der Absorption in beiden, sowohl beim Anblicke gegen direkt darunter gelegtes weisses Papier, wie durch Be-

achtung der Schatten, welche auf den Farbenstreif des letzteren fallen, wenn man dasselbe etwas entfernter unter die Glasplatte hält, oder bei Betrachtung dieser selbst von der unteren Fläche mit Hülfe eines Spiegels. Die Tropfen sehen im auffallenden, monochromatischen Lichte, soweit Absorption stattfindet, wie neutral graue bis schwarze Tinte, die Netzhäute vom Gelbgrün bis zum Anfange des reinen Violet, wie polirte, schwarze Nägelköpfe, im Violet, Gelb und Orange eigenthümlich graufarbig aus, während im Roth die ersteren von Wassertropfen, die letzteren von vollkommen entfärbten Netzhäuten nicht zu unterscheiden sind. Wird das ganze Object durch kurzes Halten ins weisse Tageslicht bis zum Gelb gebleicht, so ist das Ansehen im Spectrum im Sinne der Curve des Sehgelb (Fig. 2 *B*) verändert. Da die Netzhäute, wie die Tropfen, hinreichende Oberflächenreflexionen haben, sind die sie beleuchtenden Farben unter geeignetem Winkel natürlich auch an den Absorptionsstellen, etwa wie über schwärzliche Gründe gegossen, sichtbar, was die Entscheidung wenigstens im Orange, Gelb und Violet erschweren kann. Einige Neigungen des Kopfes oder Betrachtung mit einem zum Auslöschen des polarisirten Oberflächenlichtes vor dem Auge gedrehten Nicol'schen Prisma, schützen hier leicht vor Täuschung. Netzhäute vom Menschen, dem Kaninchen, Hunde, Rinde, der Eule, entweder in längere Streifen zerschnitten ausgebreitet, oder nach Bedürfniss von einem Ende bis zum andern durch das Spectrum geschoben, zeigen dasselbe Verhalten wie die des Frosches, wenn man den Differenzen der Schichtdicke und der Sättigung ihrer Farbe Rechnung trägt. An der Eulennetzhaut überrascht namentlich das tiefgraue Aussehen im Gelb, das man auch vor der Natronflamme in weit stärkerem Grade, als an der Froschretina, wo es übrigens schon sehr merklich ist, wahrnimmt.

Es bedarf der Bemerkung kaum, dass man durch Vereinigung der vom Sehpurpur nicht oder wenig absorbirten Strahlen des monochromatischen Lichtes mittelst einer zweiten Sammellinse ein Bild von genau der Farbe erhält, mit welcher uns die Netzhaut am weissen Tageslichte erscheint. Dieselbe ist im Wesentlichen eine Mischung von viel Roth und Violet mit sehr wenig Orange, Gelb und grünlichem Gelb, und so wenig von dem letzteren, dass eben bei grosser Verdünnung oder Zumischung von weissem Lichte in unserm Auge kaum mehr Purpur, sondern Weissviolet, also Lila daran zu sehen ist. Das Complementär dieser Farbe ist nahezu schon das des Violet, also noch sehr gelbliches Grün und nicht das des Purpurs, also kein reines Grün. Hiermit stimmt der Ort der Maximalabsorption im Spectrum, der stets vor *E* aber doch auch nicht ganz soweit ge-

gen *D* liegt, wie die gelbere Farbe, die mit reinem Violet gemischt Weiss liefert, überein.

Ein Nachtheil der Untersuchung im objectiven Spectrum liegt nur in der grossen Intensitätsabnahme seines Lichtes vom Grün zum Violet, welche die Absorption im Blau leicht zu gross erscheinen lässt und den Vergleich mit derjenigen in stärker leuchtenden Farben zwar nicht mehr beeinflusst, als bei der gewöhnlichen Methode, aber sich nicht so einfach wie dort durch blosse Dickenänderung der absorbirenden Schicht controliren lässt.

Physiologische Bestimmung der Netzhautfarbe. Mit den Resultaten der monochromatischen Untersuchung stimmt die Wirkung der Netzhautfarbe auf unser Auge überein. Man fixire eine frische Froschretina im gerade ausreichenden Tageslichte, indem man sie plötzlich aufdeckt, und nach etwa 20 Secunden wieder mit weissem Papier zudeckt und man wird ein reingrünes inducirtes Nachbild ohne jede Empfindung von Blaugrün erhalten. Demnach muss das Bild einer frischen Netzhaut mit reinem Grün in unserm Auge gedeckt, weiss oder neutral grau werden, was in der That zu sehen ist, wenn man es mit dem eines von rein grünem arsenigsaurem Kupfer gefärbten Papiers mittelst irgend einer der Helmholtz'schen physiologischen Mischungsmethoden zusammenfallen lässt. Eine Froschnetzhaut im Dunkelzimmer durch ein schwaches Bündel gemischter Lichtstrahlen gerade genügend beleuchtet, nachdem ein objectives Spectrum in ihre nächste Nachbarschaft projicirt worden, wird hellgrau bis weiss gesehen, wenn man von den Spectralfarben Alles bis auf das reine zwischen *E* und *b* befindliche Grün abblendet und den erhaltenen Rest durch einen achromatisirten, doppelbrechenden Kalkspathkrystall blickend, mit der Netzhaut zur Deckung bringt. Wird der Sehpurpur dagegen mit Blaugrün, das reinem Roth complementär ist, physiologisch optisch gemischt, so erhält man statt neutralem Grau oder Weiss entschieden bläuliche Nuancen.

Bringt man endlich die Froschretina mit dem Weiss einer vom Tageslichte erleuchteten reinen Papierfläche zur Deckung, so blasst das Bild, das wir empfinden, zu Rosa ab.

Wie leicht die Resultate dieser Versuche sich ändern, wenn die Retina ein wenig angebleicht worden, wird später beim Sehgelb erörtert.

Aussehen im Partialweiss und in einigen Mischfarben. Bei der ausserordentlichen Veränderlichkeit der Netzhautfarbe, welche das Auge des Beobachtenden fortwährend zur Entscheidung über sehr feine Nuancen anruft, sind diesem alle Mittel willkommen die Absorption verschiedenwelligen Lichtes in der Membran unter möglichst variirten Bedingungen zu prüfen und einigermaassen objectiv werden zu lassen. Sehr geeignet die Unterschiede normalen Sehpurpurs von solchem, dessen Zersetzung soeben begonnen, oder die Differenzen von Purpur und Roth schlagend hervortreten zu lassen, sind Betrachtungen der Netzhaut in Mischungen aus 2 Farben,

welche zu dem Ende aus dem Spectrum durch Abblenden mittelst des HELMHOLTZ'schen Doppelspaltes isolirt und nach den ebenfalls von HELMHOLTZ angegebenen Methoden zu einem Bilde vereinigt werden. Stellen wir so aus zwei Complementären Weiss her, so erscheint die Netzhaut in diesen Partialweissen: 1. aus Roth und Blaugrün, rein dunkelroth, wie Carmin und Zinnober davon belichtet auch aussehen, — 2. aus Gelbgrün und Violet, grauviolet, während Zinnober darin farblos dunkelgrau wird; (hier ist die Froschnetzhaut, wegen der grünen Stäbchen, welche grünliche Nuance der ganzen Fläche aufkommen lassen, unbrauchbar; man nimmt Salamander- oder Kaninchenretinae) — 3. aus Orange und Cyanblau, grauorange, wie mit einem Schleier überzogen, durch welchen um so mehr Orange schimmert, je röther dasselbe aus dem Spectrum genommen, — 4. aus Gelb und Indigoblau, graugelb, ebenfalls wie verschleiert, und zwar um so stärker getrübt, je mehr Gelb in die Lichtmischung einging. Erstaunlich sind die Unterschiede des Aussehens von Netzhäuten und rein rothen Pigmenten in aus spectralem Roth und Violet oder aus Roth und Blau gemischtem Purpur. Während Zinnober in ersterem ganz stumpf grauroth aussieht, scheinen Carmin und die Retina darin wie wässrig glitzernd, kaum von der übrigen beleuchteten Fläche zu unterscheiden und wenn man diese im Umkreise zudeckt, wie flammend, purpurleuchtend; in dem Pseudopurpur aus Roth und Blau bildet die Netzhaut, ebenso wie der Zinnober einen scharf markirten, brandrothen Fleck, der um so heller ist, je weniger blaues Licht zur Mischung verwendet worden.

Farbe der Netzhaut in situ.

Bei der hohen Durchsichtigkeit der Netzhaut und ihrer Stäbchenschicht muss auch die intensivste Farbe der letzteren eine Lackfarbe sein. Vollkommene Lackfarben sind vor gehörig schwarzem Grunde nicht erkennbar; wenn man also im Auge etwas von der Netzhautfarbe erkennen sollte, so ist der Hintergrund entweder nicht dunkel genug, oder der farbige Schleier ist nicht als ein vollkommen lackfarbener anzusehen. Das erstere trifft für die Augen der meisten Menschen und Thiere zu, das zweite unter gewissen Umständen. Im Froschauge ist der Grund so undurchsichtig, dass ausser dem Orte der Papille nirgends Licht durchdringt, nicht einmal so viel, um Erhellung vom Dunkelzimmer aus wahrnehmen zu lassen, wenn der Augengrund den Verschluss am Heliostaten bildet, während mit einer Linse vereinigtes, directes Sonnenlicht auf die Sclera fällt; eine vollkommene Lackfarbe in diesen Grund gegossen ist darin weder von

Wasser, noch von Tinte zu unterscheiden. Wie BOLL richtig angab, erkennt man an der Froschretina in situ aber eine schwache Farbe, anscheinend genügend um allenfalls Unterschiede zwischen vollkommen gebleichten und maximal gefärbten Netzhäuten erkennen zu können. Dies muss von Licht herrühren, welches aus den hinteren Schichten der Netzhaut reflectirt wird, und da man den Schleier der Retina um so deutlicher erkennt, je schräger man darauf sieht, so scheint es sich um Licht zu handeln, das von den convexen Aussenflächen der Stäbchen zerstreut und durch eine Reihe benachbarter Stäbchen schräg durchgegangen ist. Indess überzeugt man sich, dass die Retina schräg angesehen wohl heller und deutlicher wird, aber nicht ihre Farbe; was hier besser gesehen wird ist also wahrscheinlich gar kein Licht, das die Mäntel der Cylinder erreichte, sondern aus den vordereren Retinaschichten reflectirtes. Die Spur wirklicher Färbung von entschieden violetter Nuance, um die es sich handelt, wird vielmehr bei senkrechter Blickrichtung zum Augengrunde wahrgenommen und man kann kaum zweifeln, dass sie von solchem Lichte herrührt, welches an den Oelkugeln und von dem sonstigen glänzenden Inhalte der fuscinfreien Zellkuppen des retinalen Epithels reflectirt wird. Die davor liegenden Stäbchen sind beim Frosche lang genug, um an dem zweimal durch sie gegangenen Lichte, in Folge des Purpurgehaltes bis zur Erkennbarkeit der Restfarbe genügende Absorption zu vollziehen. Dass man in den netzhautfreien Augengrund hineingegossenes, lackfarbenes Blut nicht erkennt, erklärt sich zur Genüge aus der Bedeckung des epithelialen Reflectors mit seinen weichen, zurücksinkenden, fuscinhaltigen Zellfortsätzen.

Im Säugerauge fehlen dem Epithel, mit wenigen Ausnahmen, die Fetttropfen und die ebenfalls glänzenden Myeloïdkörner. Hier kommt aber sowohl das Tapetum wie die Reflexion an der Sclera, welche vom Pigmente der Chorioïdea ungenügend gedeckt wird, in Betracht. Man sieht daher die Netzhautfarbe wenigstens immer so viel angedeutet, dass ein Stück des davon befreiten Grundes nicht nur am Verluste des Glanzes, sondern auch an einer Modification seiner Farbe kenntlich wird, immer der Art, dass das mit dem Purpur beschleierte Braun chocoladefarbener, das andere zimmtähnlicher oder gelblicher, wie um ein Nuance Violet herabgestimmt, erscheint. Der Unterschied ist jedoch so gering, dass eine local ausgebleichte Stelle der Netzhaut, mit ganz scharfen Grenzen, nie in ihrer Gestalt zu definiren, sondern nur als Fleck dem Orte nach zu bestimmen ist, sogar im Augengrunde albinotischer Kaninchen.

Wo ein fuscinfreies Tapetum vorkommt, ist die Netzhautfarbe als

schön rosenfarbener Hauch zu erkennen, falls der glänzende Hintergrund, wie beim Hund und bei der Katze, vorwiegend weiss oder gelblich aussieht, in andern Fällen, wie bei den meisten Pflanzenfressern, zeigt sich dagegen so gut wie nichts vom Sehpurpur, weil der Grund bläulich oder grünlich irisirend durchschimmert. Hätten solche Augen Stäbchen von der Länge der Froschcylinder, so wäre vielleicht mehr Farbe daran zu sehen oder wenigstens locale Ausbleichung schärfer daran zu erkennen, als es selbst beim Hunde und der Katze möglich ist.

Noch ungünstiger sind die Verhältnisse am uneröffneten, lebenden, blutversorgten Auge, denn da bleibt, abgesehen vom Tapetum und von den Lücken in der Chorioïcapillaris, nur zweimal durch rothes Blut gegangenes Licht als Beleuchtung übrig: zur Erkennung der vorgelegten zarten Purpurschicht gewiss das denkbar schlechteste Mittel. Die Bemühungen der Ophthalmologen den Sehpurpur mit dem Augenspiegel zu sehen[1], sind daher nach der überzeugend begründeten Darstellung von O. Becker[2] als gescheitert zu betrachten und die Differenzen der L e u c h t f a r b e vor und nach dem Tode, welche Boll der Vergessenheit wieder entriss, indem er sie zum Beweise sowohl des Vorkommens, wie des rapiden cadaverösen Schwindens des Sehpurpurs beim Säugethiere und dem Menschen zu verwenden suchte, als auf die einfach klare Ursache zurückgeführt, welche nur in der Gegenwart oder Abwesenheit des Blutes liegt.

Zum Beweise, dass keiner der zahlreichen Augenärzte, welche die Netzhautfarbe ophthalmoskopisch gesehen zu haben meinten, dieselbe vom Blute unterschieden, wies O. Becker darauf hin, dass ihnen ohne Ausnahme der Anblick des besten Beweisobjectes, das die Natur dem Kaninchenauge an möglichst günstiger Stelle, besonders entwickelt in der Sehleiste verliehen, erkannt habe.

Coccius[3], der sich gleichfalls von der mangelhaften Sichtbarkeit der Farbe der Netzhaut in situ am eröffneten Säugerauge überzeugte, zeigte wie gut dieselbe an Falten oder an schräg gedrückten Stellen des retinalen Ueberzuges zum Vorschein komme, und erklärte dies aus der absorbirenden Wirkung mehrerer abnorm und schräg übereinander gelagerter Stäbchen zu einer die Cylinderlänge an Dicke übertreffenden Schicht. Die Erklärung ist gewiss richtig aber in sofern unvollständig, als noch der ebenfalls neue Umstand hinzukommt,

1 Vgl. u. A. Dietl und Plenck, Centralbl. f. d. med. Wiss. 1877. S. 273.

2 O. Becker, Ophthalmoskopische Sichtbarkeit des Sehpurpurs. Klin. Monatsbl. f. Augenheilkunde XV. Beilage. S. 145. 1877.

3 Coccius, Acad. Progr. Leipzig 1877.

dass das einfallende und wieder reflectirte Licht die Stäbchen auch am Mantel treffen kann, was in der geordnet normalen Lage, wenigstens beim Frosche unmöglich ist.

An abgestorbenen, weisslich trüben Netzhäuten ist natürlich das Erkennen der Farbe von vorn, obwohl man die Membran als solche nun besser vor dem Grunde unterscheidet, erschwert, nach dem Abziehen, von der Aussenfläche her erleichtert.

Unter dem Mikroskope ist die Farbe überall in voller Pracht an den Stäbchen zu sehen, wo die Cylinder aufrecht stehen und deren volle Länge als Schichtendurchmesser der Farbe zur Geltung kommt, weniger gut an schrägliegenden, die innerhalb der Mosaik ihrer auf der Basis stehenden Nachbarn sogar complementär grün erscheinen. Einzeln liegende Stäbchen im kürzesten Durchmesser von der Cylinderfläche gesehen, zeigen nur bei grosser Dicke (Frosch, Salamander, Triton) blasse rosa oder lila Färbung. Ausschliesslich bei den Tritonen ist diese Lage die günstigere, vermuthlich weil deren merkwürdigen Uebergangsbildungen von Stäbchen und Zapfen den Purpur in einer Rindenschicht der Aussenglieder führen.

4) Photochemische Zersetzung des Sehpurpurs.

Ans Tageslicht gebracht schlägt die Netzhautfarbe entweder allmählich in rötheren Purpur, reines Roth, Orange, Gelb und Chamois um, ehe sie vollkommen farblos wird, oder sie geht mit einem Schlage durch blasses Lila zur Farblosigkeit über. Je frischer die Netzhaut und je lichtempfindlicher in Folge davon, aus noch zu erörternden Gründen, der Purpur ist, desto mehr ist die letztere Erscheinung ausgeprägt, nirgends wahrscheinlich mehr, als an der lebenswarm dem menschlichen Auge entnommenen Retina. Froschnetzhäute, obwohl in directem Sonnenlichte anscheinend momentan bleichend, lassen fast immer zuvor ein gelbes oder chamoisfarbenes Stadium deutlich aufkommen. Schneller als die Netzhaut wird die Purpurlösung gebleicht und in dieser ist Chamoisfarbe oft kaum kenntlich, während die gelbe nur an directem Sonnenlichte zu übersehen ist. Diese Wirkung des Lichtes ist eine ganz directe und wenn irgend eine Stelle der Netzhaut mit einer undurchsichtigen Decke belegt wird, so findet sich deren Bild als farbiger Rest, scharf gezeichnet in der Stäbchenschicht, nachdem die Umgebung entfärbt worden. Augenscheinlich ist die Wirkung abhängig von der Intensität des Lichtes, langsam verlaufend bei schwacher Beleuchtung; bei zur Erkennung der Zwischenfarben gerade ausreichendem Lichte nimmt sie 15—30 Minuten in Anspruch; vor Gas- und Kerzenlicht kann es selbst eine Stunde dauern, bis die

Netzhaut farblos wird, während die Bleichung durch Magnesium- und electrisches Licht sehr rasch verläuft. Tageslicht ist Nachmittags bei anscheinend gleicher oder etwas grösserer Intensität erheblich weniger wirksam als Morgens oder Mittags. Nachwirkungen als Folge begonnener Bleichung sind niemals zu beobachten, ebensowenig ein anderer Effect, als der der Verdünnung, wenn eine ausgeblichene Purpurlösung zu unbelichteter gefügt wird. Messende Bestimmungen der gesetzlichen Beziehungen zwischen Lichtintensität und Bleichungszeit fehlen noch.

Unter den Bleichungsfarben findet sich das in der Natur zwar recht häufige, aber wenig auf sein Verhältniss zu monochromatischen Farben beachtete Chamois.[1] Dasselbe tritt in der belichteten Retina in vielen Nuancen und mit verschiedener Sättigung auf; bald ist es mehr rosen- oder fleischfarben, bald mehr zimmtähnlich. Ohne Zweifel erhalten wir diese eigenthümlichen Empfindungen von gemischten Eindrücken, in denen sich Violet neben dazu nicht complementärem Gelb geltend macht, am neutralsten, obschon wenig gesättigt, durch Mischung von spectralem Gelb und dem Violet des Spectrums, mehr zum Roth neigend aus Orange und Violet, oder aus Roth, Gelb und Violet. Da Purpur Violet enthält neben Roth, so erzeugt die Zumischung von Gelb auch zum Purpur chamois Nuancen, die um so deutlicher werden und um so besser vom Orange zu unterscheiden sind, je geringer die Sättigung ist. Dies ist der Grund des Auftretens der Chamoisfarbe bei der Bleichung des Sehpurpurs, wo es zugleich die sicherste Bürgschaft für die Anwesenheit kleiner Reste noch vorhandenen, unzersetzten Purpurs in einem Ueberschusse von Sehgelb liefert. Welchen Einfluss die Mitwirkung viel weissen Lichtes auf die Deutlichkeit des Chamois hat, lehrt das Verdünnen einer am Lichte orange gewordenen Sehpurpurlösung, welche dann gleich dazu umschlägt. Das Chamois entsteht aber auch aus Purpur ohne Zusatz von Gelb, wenn die aus spectralem Roth und Violet zusammengesetzte Farbe mit so intensivem weissen Tageslichte beschienen wird, dass uns das darin enthaltene Roth einzeln in Gelb umzuschlagen scheinen würde. Für die Netzhaut trifft dies jedoch nicht zu, da die Sehpurpurlösung mit Wasser verdünnt niemals chamois wird, was nur ein weiteres Zeichen für die starke Wirkung ihres Violet auf unser Auge ist. Höchstens könnten die Rosanuancen, die dem Verdünnungslila vorangehen, in den Verdacht kommen, leichte chamois Schattirung darzustellen. Ganz frische Netzhäute so betrachtet, dass ihr Bild sich in unserem Auge mit einem intensiv weissen deckt, sehen nicht chamois aus; es genügt aber die geringste Anbleichung um das Rosa dahin schlagen zu sehen, zu einer Zeit, wo die gewöhnliche Betrachtung noch keine merkliche Aenderung des Purpurs erkennen lässt.

Im ersten Stadium photochemischer Zersetzung nimmt die Retina nun wirklich die rein rothe Farbe an, die zu so vielen Täuschungen über ihre ursprüngliche Farbe geführt und das Verständ-

1 W. Kühne a. a. O. S. 459 f.

niss ihrer Veränderung durch Licht bei Manchen ganz verhindert hat. Einigermaassen objectiv überzeugt man sich davon an der schon erwähnten Steigerung der Absorption im violetten Ende des Spectrums, besser und überaus schlagend durch Betrachtung im Purpurlichte aus Spectralfarben und zwar der Art, dass von zwei Netzhäuten, die Niemand ohne solche Hilfsmittel sicher zu unterscheiden vermöchte, sofort zu sagen ist, welche derselben einen Augenblick an gewöhnlichem Lichte gewesen, wenn die andere davor geschützt geblieben: die letztere sieht dann, wie bereits beschrieben, purpurflammend, die erstere stumpf ziegelroth aus, kurz der Unterschied ist, wie der von Carmin und Zinnober in dieser Beleuchtung. Complementär zu solchen Netzhäuten ist nicht Grün, sondern Blaugrün, so dass eine zur Hälfte angebleichte Retina ein doppelfarbiges inducirtes Nachbild liefert und mit reinem Grün in unserm Auge gemischt zur einen Hälfte gelbgrau, zur andern neutralgrau aussieht.

Manche Netzhäute werden am Lichte auffallend spät farblos, indem der Purpur zwar wie gewöhnlich schnell umschlägt, das rothe und orange Stadium aber sehr verlängert wird und das letzte Gelb oft stundenlang zerstreutem, gutem Tageslichte standhält. Tritt die Erscheinung an frischen Netzhäuten auf, so deutet sie auf eine, namentlich bei Fröschen vorkommende, Abnormität, die sich meist schon in der ungewöhnlich wenig purpurnen Farbe der Dunkelretina zu erkennen giebt. Beim Aal und bei der Eule wurde Aehnliches gesehen. Für Leichenaugen findet dies Verhalten später Erklärung.

a) *Wirkung des monochromatischen Lichtes.*

Kann die Retina sich auch an gedämpftem Lichte, besonders bei gewissen Farben desselben, stunden- und tagelang ungebleicht halten, so giebt es doch kein monochromatisches, sichtbares Licht, das ohne Wirkung auf Sehpurpur wäre. Nur wo unser Auge gar nichts sieht, also im Bereiche der dunklen thermischen Strahlen, erhält sich die Netzhautfarbe unbegrenzt. Ob die Strahlen kürzester Wellenlänge, welche nicht mehr durch Fluorescenz, sondern nur durch chemische Wirkungen kenntlich werden, Sehpurpur vielleicht sehr langsam afficiren, ist noch nicht festgestellt.

Durch rothe Gläser gegangenes, directes Sonnenlicht, das spectroskopisch untersucht nur Roth bis zur FRAUNHOFER'schen Linie *C* zeigt, bleicht die Froschnetzhaut in zwei Stunden vollkommen, ebenso Natronlicht von grösster Intensität. Bedeutend schneller wirkt das durch Kupferoxydammoniak zu erhaltende, nur aus blauen und violetten Strahlen bestehende, und das durch grüne mit Chromoxyd gefärbte Gläser herzustellende, nur Grün verschiedener Nuancen ent-

haltende Licht; bestenfalls ist die Bleichung dann in 5—10 Minuten vollendet, im blauen bei etwa gleich scheinender Intensität erheblich früher als im grünen.

Zur genaueren Untersuchung dient das objective Spectrum des Sonnenlichtes, welches durch einen hinreichend engen Spalt erhalten, rein genug ist, wenn es die stärkeren FRAUNHOFER'schen Linien scharf zeigt, und in seinen einzelnen Theilen intensiv genug, wenn es die Länge von 15 Ctm. nicht überschreitet. Für rasche Wirkungen nimmt man es so blendend hell und kurz wie möglich. Da in dem durch Brechung erhaltenen Spectrum das blau-violette Ende zum Nachtheile seiner Intensität, im Vergleiche zum rothen bis grünen stark gedehnt ist, sind in manchen Fällen Beugungsspectra zu verwenden, bei denen das rothe Ende die grössere Ausdehnung hat. Man wählt dazu das durch Reflexion des Sonnenlichtes an dem galvanoplastischen, spiegelnden Silberabdrucke eines äusserst feinen NOBERT'schen Glasgitters erhaltene Spectrum erster Ordnung. Um die Interferenzspectra möglichst frei von diffusem, weissen Lichte zu erhalten, was in einigen Fällen besonders nöthig wird, ist die Linse zwischen dem Gitter und dem Projectionsorte und zwar so aufzustellen, dass nur dem Spectrum erster Ordnung angehörige Strahlen auf sie fallen; das kleine Farbenband ist dann von grosser Schärfe. Das Einführen der Netzhäute in das Spectralbild geschieht zweckmässig auf vertical stehenden Platten von Porzellan oder Milchglas, an welche die Membranen leicht in einer Horizontalreihe anzukleben sind. Die Purpurlösung wird in der schon beschriebenen Weise zu einer Tropfenreihe ausgebreitet in horizontal projicirte Spectra geschoben.

In den Einzelfarben des Spectrums tritt die Zersetzung des Sehpurpurs immer in der Reihefolge auf, dass sie im Gelbgrün, am Orte der stärksten Absorption, beginnt und im Grün, Blau, Grüngelb, Gelb, Violet, Orange und Roth in dem Maasse vorschreitet, in welchem die Absorption dort von vornherein am geringsten ist. Zwischen dem Gelbgrün und Gelb sind die zeitlichen Differenzen daher im Allgemeinen bedeutend, zwischen Gelbgrün und Grün bis Blaugrün gering, erheblich zwischen Gelbgrün und Blau, grösser zwischen Gelbgrün, Violet und Orange, am grössten zwischen Gelbgrün und Roth. Hinsichtlich der absoluten Zeit lässt sich bei der Abhängigkeit von der Intensität nur ganz allgemein für bestes Licht geltend angeben, dass starke Aenderung an der Retinafarbe und besonders an Tropfen der Purpurlösung, im Gelbgrün nach unmessbar kurzer Zeit, im Grüngelb bis Indig nach 2—10 Min., im Gelb nach 20 Min., im Violet und Orange nach 30 Min., im Ultraviolet nach 45 Min., im Roth noch etwas später zu beobachten ist. In sehr kurzen Spectren erfolgen die Veränderungen viel schneller, es sind aber die Unterschiede in diesem Falle wegen des nahen Zusammenrückens der Farben schwer anzugeben.

Die frischen und während des Belichtens feucht erhaltenen Netzhäute vom Frosche und Kaninchen zeigen nach der Exposition im Spectrum, vor vollendeter Bleiche, gewisse Differenzen, indem ihre Farbe vom rothen Anfange des Spectrums bis ins Grün hin, mehr zum gelb neigt, von dort bis zum violetten Ende, mehr zum lila. Jedes Licht erzeugt zwar aus dem Sehpurpur, vor der vollständigen Entfärbung, etwas Gelbes, vor dem Sehweiss also Sehgelb, aber die weitere Wirkung auf das Sehgelb ist bei den Einzelfarben nicht dieselbe, wie auf den Purpur. Das Sehgelb wird am schnellsten durch blaues Licht, etwas langsamer durch violettes, noch langsamer durch grünes, viel langsamer durch gelbgrünes, durch gelbes und rothes Licht erst nach ausserordentlich langer Zeit ganz gebleicht. Soll nun die Wirkung monochromatischen Lichtes verschiedener Wellenlängen verglichen werden, so kann dies nicht geschehen durch Bestimmung der Zeit, wann die Ausbleichung vollendet ist, sondern nur indem man von der ersten merklichen Veränderung ausgeht, wobei aber wohl zu beachten ist, dass dieselbe sehr verschiedenartig sein kann, im Anfangstheile des Spectrums bis zur Mitte mehr der Art, dass der Purpur ohne sich sehr aufzuhellen verschiesst, im blauvioletten Endtheile so, dass er abblasst. Dagegen ist der Moment der vollständigen Bleichung für das Sehgelb allein sehr gut festzustellen: man braucht nur eine Netzhautreihe an mässigem Tageslichte bis zur deutlich gelben Nuance verschiessen zu lassen und erst in diesem Zustande ins Spectrum zu bringen, um sich zu überzeugen, dass jetzt der Reihe nach Blau, Violet und Grün am schnellsten Farblosigkeit herstellen. In überraschender Weise stimmt hiernach das Gesetz der zeitlichen Wirkung mit dem der Absorptionsgrösse, sowohl beim Sehpurpur, wie beim Sehgelb überein: das Licht wirkt auf diese beiden Pigmente in dem Maasse kräftiger zersetzend als es stärker von ihnen absorbirt wird.

Dem Gesetze scheinbar widersprechend ist das umgekehrte Verhalten der Netzhaut in blauem und grünem durch Absorption erhaltenem Lichte, so dass gegen das Ueberwiegen der Wirkung des grünen Spectrallichtes der Verdacht entsteht, dasselbe verdanke diesen Vorzug der stärkeren Ausdehnung und Lichtschwäche des blauen Spectralabschnittes. Wir sind zwar ausser Stande die Lichtintensität zweier Spectraltheile mit einander zu vergleichen, da weder die thermische oder die physiologische, bei der Photometrie gewöhnlich verwendete, noch die chemische Wirkung die Mittel dazu bieten, sondern in ihren Resultaten, wie bekannt, einander widersprechen, aber so viel lässt sich behaupten, dass das im Interferenzspectrum auf einen kleineren Raum zusammengedrängte Blau bezüglich des Sehpurpurs immer noch im Nachtheile ist gegen das gedehntere Grün und dass aus dem durch Brechung mittelst eines Flint-

glasprismas erhaltenen Spectrum, durch Diaphragmen ausgeschnittenes und von Sammellinsen zu kleinen Bildern gestaltetes Grün und Blau die genannten Unterschiede noch zeigen, wenn die Bildchen unserem Auge von gleicher Intensität zu sein scheinen. Diesen Thatsachen gegenüber kann nur geschlossen werden, dass wir keine Mittel besitzen einigermaassen monochromatisches Blau und Grün durch Absorption darzustellen ohne vorwiegende Benachtheiligung der Intensität des Grün. Da Kupferoxydammoniak ausser blauem auch violettes Licht durchlässt, könnte dem letzteren die Schuld beigemessen werden, allein es steht auch eine aus dem Blau und Violet des Spectrums hergestellte Mischfarbe bezüglich der Purpurzersetzung dem spectralen Grün nach.

b) Wirkung gemischten Lichtes.

Da das brechbarere Licht im Allgemeinen schneller auf das Sehgelb, das weniger brechbare zu einem grossen Theile am schnellsten auf den Sehpurpur wirkt, so bilden Combinationen beider das beste Mittel die Netzhaut in kürzester Frist total zu entfärben. Dies könnte zu dem Gedanken führen, dass die in unserem Auge die Empfindung des Weiss erzeugenden Mischungen, weil sie natürlich immer Licht verschiedener Brechbarkeit enthalten, auch die dem Netzhautpurpur gefährlichsten seien; man muss von dieser Auffassung aber abstehen, weil unter den Partialweissen aus zwei Complementären mindestens Eines existirt, das kaum besser wirkt als eine der dazu verwendeten Componenten, nämlich das Weiss aus Roth und Blaugrün, welches dem alleinwirkenden Blaugrün so wenig überlegen ist, dass man nicht sagen kann, das Roth verhelfe demselben zu schnellerer oder vollständigerer Wirkung auf die Stäbchen. Werden unter den langwelligen Strahlen jedoch solche verwendet, welche an sich bereits merklicher wirken, also Orange, Gelb und Gelbgrün, der Reihe nach mit Cyanblau, Indig und Violet gemischt, so erhält man allerdings drei Weisse von bedeutend schnellerer und gründlicherer Wirksamkeit als die der Einzelfarben. Offenbar ist es dafür aber gleichgültig, ob die Mischungen uns die Empfindung Weiss erzeugen, da dieselbe beschleunigte und vollkommenere Vernichtung der Netzhautfarbe sogar noch besser zu Stande kommt, wenn man z. B. Grüngelb und Indig zu weisslichem Grün combinirt. Mischungen von Orange oder Gelb mit Violet wirken freilich schwächer als die aus letzterem mit Cyanblau und Indig. Die Einzelfarben jeder Mischung wirken demnach überall so, wie jede für sich und nur insofern mit andern vereinigt besser, als die Totalbleiche des Purpurs in Betracht kommt. Die der Netzhautfarbe gefährlichste Combination bleibt somit die grünweisse aus Cyanblau und Grüngelb.

Bei den zum Beweise dieses Verhaltens vorzunehmenden Beobach-

tungen sind die einzelnen Theile des objectiven Spectrums in sorgfältigster Weise mittelst des HELMHOLTZ'schen [1] Doppelspaltes herauszunehmen und durch dahinter gestellte Convexlinsen zu einem Bilde zu vereinigen, wobei jedoch nicht vergessen werden darf, dass die Bilder, da wo sie sich decken, Summirung der Intensitäten bedingen. Trotz dieses Uebelstandes lässt sich durch sorgfältiges Vergleichen der Bleichungszeiten im Mischbilde und in den Einzelbildern schon eine Ueberzeugung von der Richtigkeit der vorstehenden Sätze gewinnen. Ein scharfer Beweis wurde geliefert, indem wir[2] im Mischbilde, durch schnell wechselnde Diaphragmen jeweils eine der Componenten ausschlossen, so dass die Farbenmischung in der Weise, wie in unserem Auge beim Betrachten rotirender Farbenscheiben erfolgte, und die Zeit der Bleichung im Wechselbilde mit derjenigen in den constant von den beiden Componenten einzeln beleuchteten Flecken verglichen. Ein anderes weniger vollkommenes, aber als besonderer Fall an sich Interesse bietendes Verfahren bestand in dem Umlegen der Netzhäute von einem Platze des Spectrums auf einen andern, und führte zu Resultaten, die mit den vorgenannten durchaus übereinstimmten.

Nach der geschilderten, eigenthümlichen photochemischen Zersetzung des Sehpurpurs unter Bildung eines gelben Zwischenproductes finden die sehr überraschenden, mannigfaltigen Farben angebleichter Netzhäute ihre Erklärung: in der That lassen sich alle diese Nuancen künstlich an der Sehpurpurlösung erzeugen, wenn man derselben eine am Lichte gelb gewordene, in verschiedenen Mengen zusetzt und die Mischungen ausserdem durch Wasserzusatz in verschiedenen Concentrationen herstellt.

5) Chemisches Verhalten des Sehpurpurs.

a) *Reactionen.*

An genauere analytisch-chemische Untersuchung des Sehpurpurs ist zur Zeit nicht zu denken; die verschwindend geringen Spuren von Eisen, welche die Asche sehr bedeutender Mengen blutfreier, purpurner Kaninchennetzhäute und einiger Froschretinae zeigten, lässt vielleicht auf Fehlen des Eisens in diesem thierischen Pigmente schliessen.

Zur Feststellung des allgemeinen chemischen Verhaltens und der Reactionen des Sehpurpurs dienen: die Netzhaut, die Purpurlösung und das früher erwähnte, aus Neurokeratin und Sehpurpur bestehende Präparat.

So gut die Netzhautfarbe cadaverösen Processen, der Fäulniss und manchen chemischen Einwirkungen widersteht, so leicht veränderlich ist sie durch viele chemische Verbindungen. Verändert und aufgehoben wird sie: durch Kalk- und Barytwasser, Aetzalkali', durch fast alle Säuren,

1 HELMHOLTZ, Physiol. Optik S. 303 u. 304. Taf. IV. Fig. 2.
2 A. EWALD und W. KÜHNE a. a. O. I. S. 205.

Methyl-, Aethyl-, Amylalkohol, Aether, Chloroform, Chloralhydrat, Aceton, Aldehyd, Essigäther, Senföl, Thymol, Bittermandelöl, Terpentinöl, Seifenlösungen, unterchlorigsaure Salze, Chlor, schweflige Säure, Jod, Brom. Ist die Farbe durch diese Mittel geschwunden, so ist sie durch kein anderes wiederherzustellen. Die meisten genannten Reagentien wirken fast momentan, selbst bei grosser Verdünnung, einige, namentlich im verdünnten Zustande, langsam und meist so, dass der Purpur erst, wie im Lichte, durch gelb gehend farblos wird. Zu den letzteren gehören: verdünnte Säuren [1], Chloralhydrat, Chloroform, reiner Aether, Bittermandelöl, Terpentin, für trockene Netzhäute auch absolutes Glycerin; doch geht die Farbe im Glycerin auch nach vielen Wochen nur zu hellem Gelb. In dem gelben Stadium erzeugt zutretendes Licht vollkommene Bleichung.

Für die Wirkung der Säuren (Essigsäure, Salzsäure, Phosphorsäure, Schwefelsäure, Oxalsäure, Salicylsäure) sind die chemische Beschaffenheit und die Concentration maassgebend. HCl von 5 pCt. erzeugt in 5 Min. Blassgelb, von 0,5 pCt. dasselbe nach 45 Min., von 0,1 pCt. erst nach 15 Stunden, Farblosigkeit nach 24 Stunden. Oxalsäure von 2,5 pCt. färbt die Netzhaut sofort gelb, Essigsäure derselben Concentration nach 24 Stunden erst roth.

Unverändert bleibt die Farbe: in Ammoniak, kohlensaurem Alkali, Chlornatrium jeder Concentration, in Alaun, Cyankalium, schwefligsaurem, unterschwefligsaurem und salpetrigsaurem Alkali, Schwefelammonium, Schwefelwasserstoff, ammoniakalischer, tartrathaltiger Zinnoxydullösung, Eisen- und Zinkvitriol, Eisenchlorid, Bleiacetat, Wasserstoffsuperoxyd, Ozon, Kohlensäure, Kohlenoxyd, Borsäure, Cyanwasserstoff, wasserhaltigem Glycerin, Benzol, Petroläther, Kohlenstoffdi- und tetrachlorid, Schwefelkohlenstoff, in den Fetten und Balsamen, in Oelsäure, Bergamotöl, Santonsäure und Natriumsantonat, in Harnstoff und bei der Trypsinverdauung.

Hieraus geht besonders hervor, dass energische Oxydations- und Reductions-Mittel nichts über die Retinafarbe vermögen. Ein die Auflösung stundenlang aufpeitschender, unerträglicher Ozonstrom ändert den Purpur in kleinster Menge und grosser Verdünnung nicht, weder in alkalischer noch in mit wenig Essigsäure versetzter Lösung. So lange Osmiumsäure und sehr schwach angesäuertes übermangansaures Kalium noch etwas neben der dunklen Färbung, welche diese Mittel auch an gebleichten Stäbchen erzeugen, erkennen lassen, sieht man die Purpurnuance intact.

b) Einfluss der Temperatur.

Froschnetzhäute werden in feuchtem Zustande bei 76° C. augenblicklich gänzlich entfärbt, bei 75° C. nach 1 Min., bei 71° in 5 Min., bei 70° in 8 Min., bei 65° in 30 Min., bei 60° in 1 Stunde, bei 53 und 52° erst nach mehreren Stunden. Bei 51—50° C. scheint der Sehpurpur überhaupt nicht veränderlich; Wasser und Kochsalzlösung bis zu

1 Nach Boll sollte Essigsäure an den Stäbchen eine mit den Chromophanen (vergl. unten) identische gelbe Farbe erzeugen. Arch. f. Anat. u. Physiol. a. a. O. S. 17.

10 pCt. ändern hieran nichts. Sehpurpur vom Frosche in Galle gelöst wird nach mehrstündigem Erwärmen auf 50° C. unverändert gefunden, bei 72° C. momentan entfärbt, bei 70° in 2 Min., bei 60° in 3 Min., bei 63° in 10 Min., bei 54° in 30 Min. hell chamois. Die Zersetzung beginnt hier bei 52° C. und vollendet sich von 63° C. an rascher, als am natürlichen Standorte. Zusätze von Natriumcarbonat oder von NH_3 setzen die Entfärbungstemperatur für die Netzhaut bedeutend, auf etwa 47° C., herab, wobei mit ersterem Zusatze in 3 Stunden, mit letzterem in 1 Stunde totale Entfärbung erfolgt. Sehpurpur in Lösung wird mit 1 pCt. Sodagehalt bei 50° C. in 5 Min. vollkommen entfärbt, mit wenig NH_3 bei etwa 41° C. nach längerer Zeit. Netzhäute in NaCl von 0,5 pCt. mit einem Zusatze von 1 pCt. Essigsäure werden bei 47° C. in 20 Min. gelb.

Vollkommen getrocknete Netzhäute werden bei 100° C. in mehreren Stunden nur tiefgelb und überhaupt erst bei 75° C. verändert, nach 10 Min. roth, nach 1 Stunde orange. Trocken in absolutem Glycerin erweicht bleiben sie bei 65° C. 2—3 Stunden unverändert, während sie bei 75° C. nach 30 Min. darin fast farblos werden. Längere Zeit in gesättigtem NaCl befindliche Retinae zeigen bei 65° C. nach 30 Min. die erste Veränderung und bedürfen 8—10 Min. langes Erwärmen auf 80° C. um ganz weiss zu werden. Die Gegenwart des Wassers hat hiernach bedeutenden Einfluss auf die Entfärbungstemperatur, ein Umstand, der im Zusammenhange mit der grossen Abhängigkeit dieser von der Zeit, sehr zu Vergleichen mit der Coagulation von Albuminen in der Wärme auffordert.

Purpurlösungen aus Kaninchennetzhäuten verhalten sich nicht vollkommen identisch wie die des Frosches; dieselben werden schon bei 62° C. in 2½ Min. entfärbt, während eine mit demselben Gallengehalte von 2½ pCt. aus der Froschretina hergestellte bei 63° nach 5 Min. noch chamois aussieht. Die erstere wird chamois in 4 Min. bei 58° C. Es giebt da also auf chemische Unterschiede des Purpurs in der Thierreihe, wofür sich noch viele andere Gründe finden, deutende Thatsachen.

c) *Einfluss der Temperatur auf die Lichtbleiche.*

Bei — 13° C. zu weisslich rosafarbenem Eise erstarrte Netzhäute werden durch Licht gebleicht, aber erheblich langsamer, als aufgethaute, noch unter 0° befindliche. Von 0° bis + 38°, selbst bis + 40° C. nimmt die Lichtempfindlichkeit des Froschsehpurpurs äusserst wenig zu und es erstreckt sich die kleine, bemerkbare Steigerung vornehmlich auf das erste Stadium der Sehgelbbildung. Von 45° C. an nimmt die Zersetzlichkeit durch Licht bedeutend zu, in noch grösserem, erstaunlichem Maasse mit der Annäherung an die Zersetzungstempe-

ratur oder beim Ueberschreiten dieser. An diffusem, sehr gedämpftem Tageslichte, das eine Purpurlösung von 12° C. in 11 Minuten ausblich wurde eine von 50° C. in ½ Minute farblos. Mit NH_3 versetzte, bei 10° C. in 5 Min. farblos werdende Lösungen wurden bei 40° C. augenblicklich blassgelb, gleich darauf farblos und das Gelbgrün des Spectrums blich eine bei 50° C. gehaltene Froschretina in 7 Min., eine von 12° C. bei gleicher Intensität in 20 Min. aus.

Lässt sich bei dem poikilothermen Frosche der Einfluss unter 38° C. liegender Temperaturen kaum nachweisen, so ist dieser bei den homöothermen Kaninchen innerhalb der Bluttemperaturen sehr bemerklich. Sehpurpurlösung vom Kaninchen ist bei + 35—38° C. bedeutend lichtempfindlicher als bei + 7,5° C. Es blich z. B. die erwärmte Lösung bei gleicher Beleuchtung in 20 Secunden bis zum Hellgelb, in 2½ Min. vollkommen aus, wo die kalte erst nach 2½ Min. hellrosa, nach 3½ Min. farblos wurde. Grössere Lichtempfindlichkeit des Purpurs im lebenden Auge der Warmblüter, als der Poikilothermen ist hiernach vorauszusetzen.

d) *Chemische Einflüsse auf die Lichtbleiche.*

Von wesentlicher Bedeutung für die Zeit der Bleichung durch Licht ist das Wasser, dessen Entziehung dieselbe, ähnlich wie beim Erhitzen, ausserordentlich verlangsamt, ohne die Entfärbung freilich zu verhindern.

Ohne Einfluss auf die Lichtbleiche ist sowohl der Sauerstoff, wie die Gegenwart stark reducirender Agentien, denn es sind beim gelösten, wie bei dem retinalen Purpur keine zeitlichen Unterschiede der Bleichung zu bemerken, wenn man den Versuch in O, CO, CO_2 und H vornimmt[1], oder in hermetisch verschlossenen Gläsern, von welchen die einen NH_3, die andern dasselbe NH_3 nach Sättigung mit SH_2 enthalten. Auch in abgeschlossener, ammoniakalischer Zinnoxydullösung wird die Netzhautfarbe an gleichem Lichte in gleicher Zeit verändert, wie in reinem NH_3. Demnach giebt es keine Gründe die photochemische Zersetzung der Stäbchenpigmente in Beziehung zu Reductions- oder Oxydationsprocessen zu bringen; die Purpurbleiche dürfte eher auf Zersetzung mit Wasseraustritt beruhen, worauf auch die allmähliche Verfärbung des trockenen Sehpurpurs unter wasserfreiem Glycerin deutet.

Mit Essigsäure von ½ pCt. behandelte Netzhäute zeigen im Lichte, namentlich verglichen mit alkalischen, in NH_3 oder in Soda von 2 pCt. gelegten, grössere Neigung gelb zu werden. Im Spectrum

1 Valentin behauptet das Gegentheil ohne genügende Begründung. Vergl. Moleschott's Unters. XII. S. 31.

scheinen 2 Reihen solcher Retinae sich zunächst zwar gleich zu verhalten, wenn man sie aber vor vollendeter Entfärbung an schwachem Tageslichte besieht, so findet man die sauren im Gelbgrün und Grün noch intensiv gelb, während die alkalischen dort schon entfärbt sind und die ersteren im Blau und Violet farblos, wo die alkalischen noch hellchamois oder lila aussehen. Das sieht ganz so aus, wie wenn das Sehgelb, dessen Bildung die Essigsäure ohne Licht einleitet, was bei der hier verwendeten Concentration im Dunkeln nach 24 Stunden aber kaum merklich ist, im kurzwelligen Lichte leichter von der Säure erzeugt werde, während dieselbe seine Zerstörung im weniger brechbaren Lichte verzögert. Kohlensäure scheint solchen Einfluss nicht zu haben.

6) Indolenz und Fixirung der Sehfarbstoffe.

Aus den Augen im Dunkeln gehaltener Leichen entnommene Netzhäute sind zuweilen in überraschend geringem Grade lichtempfindlich; sie werden zwar bald roth, orange, gelb oder chamois, bedürfen aber oft in gutem Lichte vieler Stunden um vollkommen farblos zu werden. Da die Thiere der Schlachthöfe gewöhnlich bis zum Tode in wenig erleuchteten Ställen verweilen und die Augen derselben später bald in dunkle Gefässe und Winkel gelangen, findet man fast die Mehrzahl der Rinds-, Schweins- oder Hammelaugen in diesem Zustande und es ist darum merkwürdig genug, dass man nicht schon lange, wenigstens von der gelben Farbe der Retina Kenntniss hatte. Nachträglich zeigt sich jetzt freilich, dass die Erscheinung schon Melloni[1] bekannt gewesen, der ausser dem gelben Flecke des menschlichen Auges, noch eine allgemeine nach dem Zusammenlegen der Netzhaut in Falten, besonsonders bemerklich werdende, gelbe Färbung hervorhob, und darauf, im Zusammenhange mit der bekannten kräftigen Wirkung des gelben Lichtes auf unser Auge, eine eigene Theorie des Sehens zu begründen suchte.

Die Indolenz betrifft den Purpur sowohl, wie das Sehgelb, den ersteren jedoch in weit geringerem und niemals bis zu dem Grade, dass nicht directes Sonnenlicht, wenigstens nach mässiger Zeit alle purpurnen bis rothen Nuancen aus der Netzhaut vertriebe. Je länger die Retina, namentlich vom Epithel getrennt, im Dunkeln verweilte um so mehr ist die Erscheinung ausgeprägt, ebenso nach gewissen chemischen Einflüssen und nach dem Trocknen. Da Purpurlösungen sich nicht so verändern und die daraus nach dem Verdunsten bleibende

1 Melloni, Compt. rend. XIV. S. 823 und Ann. d. Physik LVI. S. 574.

gefärbte Masse nur in geringem Grade indolent wird, scheint es sich um eine Fixirung der Sehfarbstoffe an irgend etwas in den Stäbchen Enthaltenes zu handeln, vielleicht um das Keratin der Hüllen, denn die schon mehrfach erwähnte Mischung des Sehpurpurs mit dem Neurokeratin ist an sich bereits in Folge der längeren, zur Darstellung erforderlichen Zeit indolenter, als die Netzhaut und wird es nach längerer Aufbewahrung im trockenen Zustande in solchem Grade, dass sie, obschon allmählich gelb werdend, selbst in der Sonne nicht ganz mehr zu entfärben ist. Wird eine in Alaun gehärtete Kaninchennetzhaut, deren Horizont, wie bei vielen andern Säugern, durch eine intensive purpurne Sehleiste bezeichnet ist, im Dunkeln getrocknet, länger über SH_2O_4 aufbewahrt, so wandelt sich ihr schönes Rosenroth, auch wenn man sie wieder befeuchtete, an der Sonne allmählich wol in Roth und Orange, nach etwa 30 Minuten in helles Gelb um, aber es ist schwer dieses Gelb durch Licht soweit zu zerstören, dass von der stärker gefärbten Sehleiste nichts mehr kenntlich bliebe.

Mit Essigsäure gelb gewordene Netzhäute verlieren die Farbe am Lichte zwar gänzlich, aber dies kann Stunden und Tage dauern, wenn die mit Wasser wieder gewaschenen Membranen länger im Dunkeln verweilt hatten und die Farbe wird nahezu so echt, wie die der meisten gebräuchlichen Farbstoffe, wenn das Conserviren im trocknen Zustande geschehen ist. Durch Licht fast unverwüstlich scheint auch die gelbe Farbe zu sein, welche purpurne Netzhäute in Sublimat annehmen. Ausser dem Trocknen und Conserviren im Dunkeln befördert Erwärmen die Indolenz. Stirbt die Netzhaut bei den alle cadaverösen Processe befördernden Temperaturen von 30—45° C. ab, so verliert sie regelmässig schneller an Lichtempfindlichkeit, soweit dieselbe an dem gänzlichen Farbenverluste bemessen wird, ein Umstand, der besondere Beachtung verdient, weil viele länger dauernde Bleichungsversuche, wie die im Spectrum namentlich, damit zu kämpfen haben, und weil z. B. das sonderbare Resultat, dass Froschnetzhäute bei 30° C. zuweilen langsamer erblassen, als bei 0° davon bedingt wird.

7) Beziehungen der Stäbchenfluorescenz zum Sehpurpur.

Die von HELMHOLTZ[1] gefundene, von SETSCHENOW[2] weiter untersuchte, weisslichgrüne Fluorescenz der Netzhaut im überviolettten Lichte rührt nur von der Stäbchenschicht her[3] und steht im Zusammenhange mit dem Sehpurpur und dessen Bleichung. Während die bereits

1 HELMHOLTZ, Ann. d. Physik XCIV.
2 SETSCHENOW, Arch. f. Ophthalmologie V. 2.
3 A. EWALD und W. KÜHNE a. a. O. S. 169.

erwähnte weissbläuliche Fluorescenz der vorderen Schichten in allen Augen gleich und unabhängig von der retinalen Phototropie zu sein scheint, wird das Helmholtz'sche Phänomen erst hervorgerufen durch die Zersetzung des Purpurs. Beim Menschen und bei allen Thieren fluorescirt die Stäbchenschicht ungebleicht schwach und mit bläulichem Scheine, bedeutend stärker und grünlich, nachdem sie durch Licht vollkommen entfärbt worden. Stäbchen ohne Purpur, wie die im Umkreise der Ora serrata des Menschen vorkommenden, lassen kaum Fluorescenz erkennen, ebensowenig die purpurfreien Zapfen; die Fovea centralis erscheint in gut conservirten menschlichen Netzhäuten, bei erwiesenem Besatze mit ihren langen Zapfenaussengliedern, im Focus überviolетter Strahlen immer als dunkler Fleck und um so auffallender dunkel, je mehr die Stäbchen der Umgebung zu fluoresciren beginnen. Im Leben des Purpurs durch Licht beraubte Netzhäute fluoresciren an der Rückfläche ebenfalls grünlichweiss, aber sehr schwach.

v. Bezold und Engelhardt [1] beobachteten mit dem Augenspiegel, der das Bild eines Spectrums auf der Netzhaut entwarf, Erscheinungen an den Blutgefässen, die sie einer Fluorescenz der lebenden Membran in allen Spectralfarben vom Grün bis ins Ultraviolet zuschreiben. Während Blut dieses Licht absorbirt und darin sonst schwarz aussieht, erschien es hier in den retinalen Gefässen rothbraun bis gelbbraun. An isolirten Netzhäuten vom Menschen und vom Ochsen sieht der Gefässbaum in allen Theilen des Spectrums, wo das Blutroth viel Licht absorbirt, beim ersten Hinblicken schwarz aus, später in jeder einzelnen Farbe zwar sehr dunkel, aber wie von der complementären Farbe angelaufen, was auf Contrast beruhen dürfte. Ausser dem Ueberviolet scheint höchstens das Violet etwas Fluorescenz in der Stäbchenschicht zu erregen.

Ob der Sehpurpur an sich fluorescire, ist schwer zu ermitteln, weil die zu seiner Lösung verwendeten Cholate im Ueberviolet lebhaft bläulich aufleuchten. In sehr verdünntem, cholalsaurem Alkali (das weniger fluorescirt) gelöster Purpur erscheint in dem erregenden Lichte aber schwach bläulich, nach der Bleichung durch Licht heller und grünbläulich.

In der Stäbchenschicht nimmt die Fluorescenz am meisten zu, wenn das Sehgelb schwindet, viel weniger, so lange der Purpur erst bis zum Gelb umgewandelt worden. Andrerseits kann eine Netzhaut kaum gelblich geworden sein und vorzugsweise Sehweiss, neben kleinen Resten ungebleichten Purpurs enthalten, wie nach dem Liegen im indigblauen und violetten Theile des Spectrums, und doch bereits kräftig grünlich fluoresciren. Dies deutet auf das Sehweiss, als die

1 v. Bezold und Engelhardt, Sitzungsber. d. bayr. Acad. 1877. 7. Juli und Engelhardt, Klin. Monatsbl. f. Augenheilkunde XV. S. 134. 1877.

eigentliche, am stärksten und mit dem grünlichen Scheine fluorescirende Substanz, während es das Sehgelb für schwach oder gar nicht fluorescirend halten lässt.

Im Dunkeln über SH_2O_4 aufbewahrte und trocken, bis zum Gelbwerden besonnte Retinae fluoresciren kaum, verhalten sich aber wie frisch gebleichte, wenn sie befeuchtet, nach langer Besonnung endlich farblos geworden sind. Benetzung mit Chlorzinklösung steigert die Fluorescenz hier, wie an allen entfärbten Stäbchen bedeutend.

Ein Mittel ohne Licht aus Sehpurpur nur Sehgelb, ohne Sehweiss zu erzeugen, scheint im Chlorzink zugleich gegeben, denn es färbt die Netzhaut im Dunkeln gelb und beraubt sie zunächst aller Fluorescenz. Hierauf bis zur Farblosigkeit belichtet, entwickelt die Membran aber die stärkste Fluorescenz, deren sie überhaupt fähig ist. Auch mit Essigsäure im Dunkeln gelb gewordene Retinae sind fast frei von Fluorescenz und nehmen sie nach vollständiger Lichtbleiche an.

Vollständig aufgehoben wird das Vermögen zur Fluorescenz durch Benetzung mit Alkohol oder ätzenden Alkalien. Wird der Alkohol erst angewendet, nachdem die Stäbchen vom Lichte gebleicht worden, so bleibt die Fluorescenz erhalten. Der Alkohol ist daher vielleicht ein Mittel, das einmal fertiges Sehweiss nicht verändert, während er am Purpur, ebenso wie die Alkalien, wahrscheinlich ganz andere mit Entfärbung verbundene Aenderungen erzeugt, als das Licht.

G r ü n e S t ä b c h e n wurden von Boll in der Froschnetzhaut entdeckt[1], von Ewald und mir ausserdem nur bei den Kröten gefunden und schon bei deren nächsten Verwandten, Salamandern und Tritonen vermisst. Dieselben sind identisch[2] mit den von Schwalbe[3] gefundenen Stäbchen mit kurzen Aussengliedern, deren Innenglied in Gestalt eines langen Fadens weit hinter der M. limitans ext. beginnt und zwischen den vorderen Theilen der purpurnen Cylinder benachbarter Stäbchen verpackt liegt. Der Beweis dafür liegt in der gänzlichen Unsichtbarkeit aller grünen Stäbchen von vorn, wo man nur die optischen Querschnitte jener farblosen Fäden, als kleine Kreise bemerkt, und in dem Fehlen dieses Bildes bei allen Thieren, ausser bei den Fröschen und Kröten. An der Rückfläche der Retina ragen die grünen Stäbchen weiter in das Retinaepithel hinein, als die übrigen. Durch Licht werden sie langsamer gebleicht, als die purpurnen, wie diese jedoch schliesslich vollkommen und direct, d. h. nur so weit das Licht reicht. In ausgeblichenen Netzhäuten sind sie leicht an der geringeren Durchsichtigkeit kenntlich. Ob ihre Färbung von einem Farbstoffe herrühre, ist noch nicht festgestellt.

1 Boll a. a. O.
2 W. Kühne a. a. O. II. S. 131 u. 132. Taf. VII.
3 Schwalbe a. a. O.

B) Farbstoffe der Zapfen.

Im vollständigsten Gegensatze zu den Stäbchen sind die Aussenglieder der Zapfen nirgends, weder bei im Dunkeln, noch bei im Hellen, oder in farbigem Lichte gehaltenen Thieren gefärbt. Es ist hier also nur von Farbstoffen der Innenglieder zu handeln. Das Vorkommen dieser Pigmente ist auf die Vögel, Reptilien und einige Fische beschränkt.[1]

Beim Menschen und beim Affen (Macacus cynomolgus) ist die Fovea centralis nach zahlreichen Beobachtungen gut erhaltener Augen im Dunkeln Verstorbener[2] niemals gefärbt. Im Grunde eines frisch eröffneten Auges erkannte Horner[3] die Stelle zwar als kleines, dunkles, kirschfarbenes, sehr vergängliches Fleckchen, aber diese Erscheinung hängt nicht mit Färbungen der nur aus Zapfen gebildeten Stelle, sondern mit deren Dünne und Durchsichtigkeit und mit der Beschaffenheit des Epithels und ihrer weiteren Unterlage zusammen. Wie es scheint ist die Fovea aller menschlichen Augen in situ sichtbar, besonders wenn es gelingt den Glaskörper vollkommen zu entfernen. Je nach der Tiefe der epithelialen und chorioïdalen Färbung erscheint sie mehr minder braun bis braunröthlich, als dunkelster Punkt der ganzen Netzhaut, woran das intensivste Licht garnichts ändert. Hebt man die Netzhaut ab, so verschwindet das dunkle Fleckchen und erscheint jetzt etwa wie ein sehr kleines, durchsichtiges Sagokörnchen, im Centrum des grösseren, jetzt erst kenntlich werdenden, gelben Fleckes vollkommen farblos. Es genügt die Netzhaut an den alten Platz zurücksinken zu lassen, um die Macula lutea wieder schwinden, die Fovea wieder auftreten zu sehen. Damit ist der Beweis geliefert, dass die Fovea in situ nicht sich selbst, sondern ihren epithelialen und chorioïdalen Hintergrund zeigt, den letzteren zuweilen vielleicht vorwiegend, weil die nach Art von Stäbchen in die Epithelzellen, durch deren fuscinhaltige Basis ragenden Foveazapfen die Uvea sehen lassen. Wo die letztere in den Pigmentlücken blutgefüllte Gefässe gegen das Epithel wendet, könnte wohl auch Blutfarbe durch die Fovea schimmern und diese röthlich erscheinen lassen, in welchem Falle auch einiger Wechsel der Foveafarbe durch Verschieben jenes Blutes möglich wäre.

1 Nach Leydig (Lehrb. d. Histologie S. 238) kommen auch bei Bombinator igneus gelbe Fettkugeln in den Sehzellen vor.

2 W. Kühne, Centralbl. f. d. med. Wiss. 1877. 24. Apr. S. 109 und a. a. O. I. S. 34, 105, 109 und II. S. 69, 89, 378, später bestätigt von Donders (Klin. Monatsbl. f. Augenheilkunde XV. Beilage. S. 156). Da die Macula lutea vorwiegend Zapfen enthält, fand ich auch diese Umgebung der Fovea frei von Sehpurpur, und es schienen selbst die wenigen dort vorkommenden Stäbchen ungefärbt zu sein.

3 Horner, Klin. Monatsbl. f. Augenheilkunde XV. S. 156 f. 1877.

In der Fovea fehlt den Zapfen auch der vordere, gelbe Schirm, welcher nach MAX SCHULTZE in der Macula lutea vor die Sehzellen gelegt ist. Hier ist der demselben angehörigen, gelben Farbe nur beiläufig zu erwähnen, weil dieselbe ausschliesslich die vorderen Netzhautschichten bis zur Zwischenkörnerschicht einnimmt und mit den Sehzellen durchaus nichts zu schaffen hat. Obwohl von manchen Seiten als präexistente Färbung bestritten, weil sie mit dem Augenspiegel und im Grunde frisch eröffneter Augen nicht zu sehen sei, bildet der Farbstoff gleichwohl einen Bestandtheil der lebenden Retina, den man nur deshalb erst an der abgehobenen, oder an der cadaverös getrübten Netzhaut auftreten sieht[1], weil es nicht möglich ist die dünne und vollkommene Lackfarbe vor dunklem Grunde zu bemerken. Das nach Ausdehnung, Intensität und Nuance im menschlichen Auge wechselnde gelbe Pigment verschwindet in einigen Tagen an der Sonne. Man überzeugt sich davon leicht an trocken ausgebreiteten Netzhäuten, deren Macula zur Hälfte vor dem Lichte geschützt worden. Die Besonnung darf nicht zu lange dauern, wenn der Unterschied der dunkel erhaltenen Stelle unter der Bedeckung merklich bleiben soll, da das ganze Präparat mit der Zeit an Luft und Licht gelb wird.

Die Chromophane.

Als Chromophane werden die in den bunten Oelkugeln der Zapfen enthaltenen Pigmente bezeichnet. Nur bei einigen Vögeln (Tauben und Hühnern) sind dieselben bis jetzt näher untersucht, aber es ist kaum zu bezweifeln, dass die bei den Reptilien vorkommenden, intensiv gefärbten Kugeln ähnliche Farbstoffe enthalten. Seit HANNOVER's[2] ersten Beschreibungen sind die an der Grenze des Innen- und Aussengliedes, im ersteren gelegenen Fettkugeln vielfach untersucht und übereinstimmend mit den sehr vollständigen Angaben ihres Entdeckers theils farblos, theils purpurn bis roth, orange bis gelb und grünlichgelb gefunden. Bei einzelnen Vögeln wurden ausserdem blassgrüne, intensiv reingrüne, blass grünlichblaue, selbst blassblaue Kugeln bemerkt. Ausnahmsweise kommen, z. B. in der Taubennetzhaut, auf eine bestimmte Region beschränkt, sehr kleine purpurne Körnchen neben der grösseren rothen Oelkugel durch das ganze Zapfeninnenglied zerstreut vor, was unter gewissen Bedingun-

1 Vgl. SCHMIDT-RIMPLER, Centralbl. f. d. med. Wiss. 9. Juni. 1877. S. 401, enth. zugleich Bestätigung der Beobachtung des Fehlens des Sehpurpurs in den Zapfen der Macula lutea.

2 A. HANNOVER, Arch. f. Anat. u. Physiol. 1840. S. 320 u. 1843. S. 314.

gen bei verschiedenen Vögeln auch für das grünlichgelbe Pigment zutrifft. Sehr häufig liegen Zapfen mit grösseren rothen und kleineren orange Kugeln paarweise durch mehrere mit farblosen oder grünlichgelben versehene getrennt, hart nebeneinander. Da in der Retina (des Falken nach SCHWALBE [1]) auch verschiedenfarbig geschichtete Kugeln vorkommen, wird es begreiflich, dass deren Farben zuweilen Unreinheiten und Uebergänge zeigen.

Dass die Pigmente in Fett gelöst seien, lehrt die schnelle und intensive Bräunung der Kugeln durch OsO_4, die Löslichkeit derselben in Alkohol-Aether, Benzol, Schwefelkohlenstoff, die Resistenz gegen Alkalien und gegen Galle und das Zerfliessen der Kugeln beim Trocknen. Die fettlösenden Mittel entfärben die Netzhäute, indem sie die Farbstoffe mit aufnehmen; solche Lösungen sind meist orangeroth, mit CS_2 hergestellt nach CAPRANICA [2] mehr dunkelroth.

a) Darstellung und Trennung der Chromophane. [3]

Um die einzelnen, sich beim Auflösen unwillkommener Weise mischenden Farbstoffe wieder getrennt zu erhalten, genügt das folgende, zugleich die Scheidung vom Fette bezweckende Verfahren. Die der vorderen Abschnitte und des Glaskörpers beraubten Augen (von 50—300 Tauben oder Hühnern) werden sogleich in absoluten Alkohol geworfen und gesammelt, und zur Vermeidung von Veränderungen, welchen die Pigmente selbst im Dunkeln, wenigstens nach monatelanger Aufbewahrung unterliegen, möglichst bald verarbeitet, indem man den nur wenig Fett und Farbe aufnehmenden Alkohol abgiesst und die Augengründe mit Aether vollkommen erschöpft. Um von dem kostbaren Materiale nichts zu verlieren, wird der Conservirungsalkohol verdampft, der Rückstand mit Aether aufgenommen und dieser zur Hauptmasse gefügt. Das nach dem Verdunsten des Aethers erhaltene, feuerrothe Fett wird hierauf in heissem Alkohol gelöst und darin mit Aetznatron rasch verseift, unter Ersetzung des verdampfenden Alkohols durch siedendes Wasser. Die nach dem Erkalten von der Mutterlauge leicht zu trennende und abzuspülende, harte Seife wird gut getrocknet zuerst mit Petroläther, darauf mit Aether, zuletzt mit Benzol extrahirt, welche Mittel der Reihe nach Chlorophan, Xanthophan und Rhodophan aufnehmen. Von diesen Pigmenten bedürfen die beiden ersteren noch einer Reinigung, da das Chlorophan nicht frei vom zweiten ist, dieses noch etwas vom ersten und Rhodophan enthält. Das fast rein gelbe, rohe Chlorophan wird dazu

1 SCHWALBE a. a. O. 2 CAPRANICA a. a. O.
3 W. KÜHNE und W. C. AYRES, Ueber lichtbeständige Farben der Netzhaut. a. a. O. I. S. 341.

in einer ungenügenden Menge Petroläther wieder gelöst, nach dessen Verdunsten es als grünlichgelbe Masse zurückbleibt. Zur Isolirung des Xanthophans wird der Verdampfungsrückstand des Aethers zunächst mit Petroläther vom anhängenden Chlorophan befreit, darauf in CS_2 gelöst, die tief orangerothe Flüssigkeit von dem ungelöst bleibenden Rhodophan filtrirt, das Filtrat rasch bei mässiger Wärme verdunstet, und wieder in Aether aufgenommen, nach dessen Verjagung das Xanthophan in gelborangen Krusten erhalten wird. Das davon erübrigte Rhodophan wird nach dem Lösen in Benzol mit der Hauptmasse dieses Farbstoffes vereinigt. Ist die Seife vollständig mit Benzol extrahirt, so hat sie alle Farbe verloren. Die gewonnenen Pigmente sind sämmtlich amorph und mit kleinen Mengen der auch im völlig trockenen Zustande in den wasserfreien Lösungsmitteln keineswegs unlöslichen Seifen verunreinigt. Was über die Löslichkeit der Pigmente zu sagen ist, hat deshalb für die reinen Substanzen nur vorläufige Geltung.

Das Chlorophan ist grüngelb, mit gleicher Farbe löslich in Alkohol und in Aether. Die Lösung in CS_2 ist tief orangegelb, liefert aber verdunstet einen helleren Rückstand, der sich in den ersteren Mitteln mit der früheren Farbe wieder auflöst und sich dann optisch nicht verändert zeigt; der CS_2 erzeugt also keine chemische Veränderung des Farbstoffs. Die Lösungen im HERMANN'schen Hämoskop vor den von direktem Sonnenlichte beleuchteten Spalt des Spectroskops gebracht, zeigen die durch Fig. 4 *A* und *B* in Curven dargestellten Absorptionen.

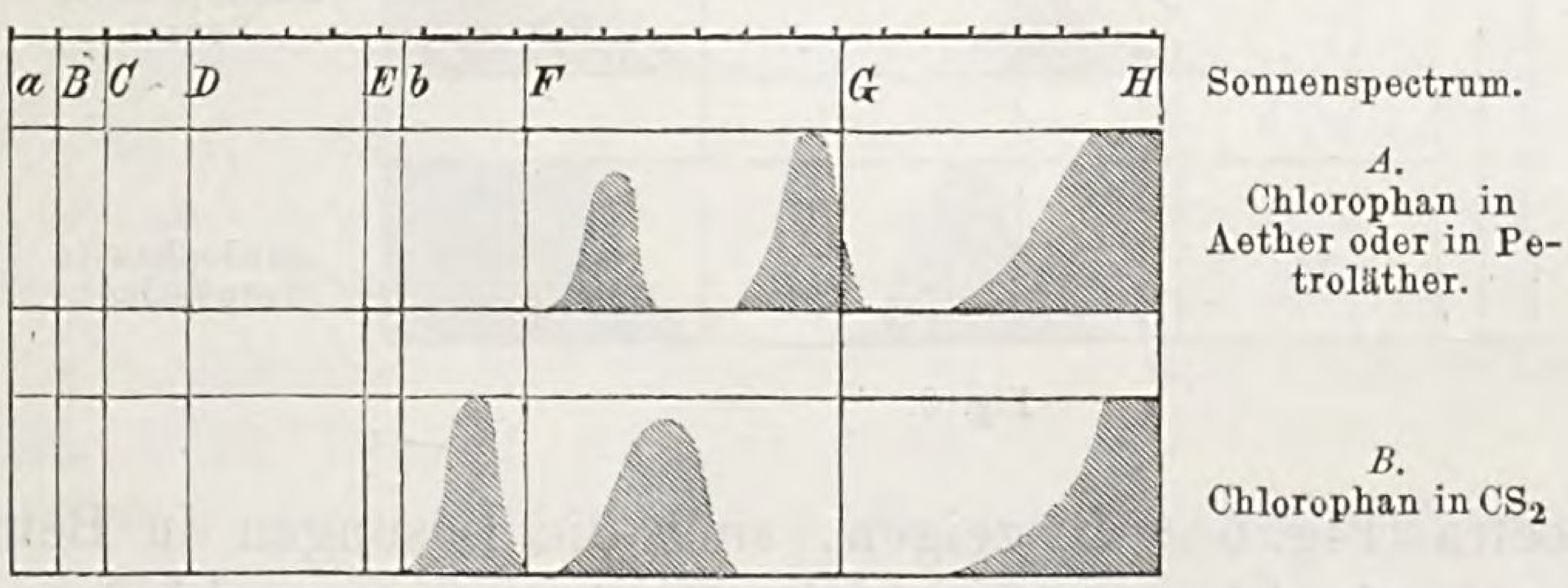


Fig. 4.

Beide Lösungen geben hiernach Verdunkelung im Violet, ohne stärkere Beschattung des Blauviolet und 2 Absorptionsbänder, die sich im CS_2 stark von *G* nach dem rothen Ende verschoben zeigen, so dass der Streif *α* zwischen *b* und *F* fällt.

Das Xanthophan ist in Petroläther wenig, leicht in Alkohol, in Aether und in CS_2 löslich, in ersteren mit rein orangegelber, in

letzterem mit rothoranger Farbe. Die Lösungen geben die Spectra (Fig. 5 *A* und *B*), also wieder starke Beschattung des Violet, aber nur einen Absorptionsstreifen.

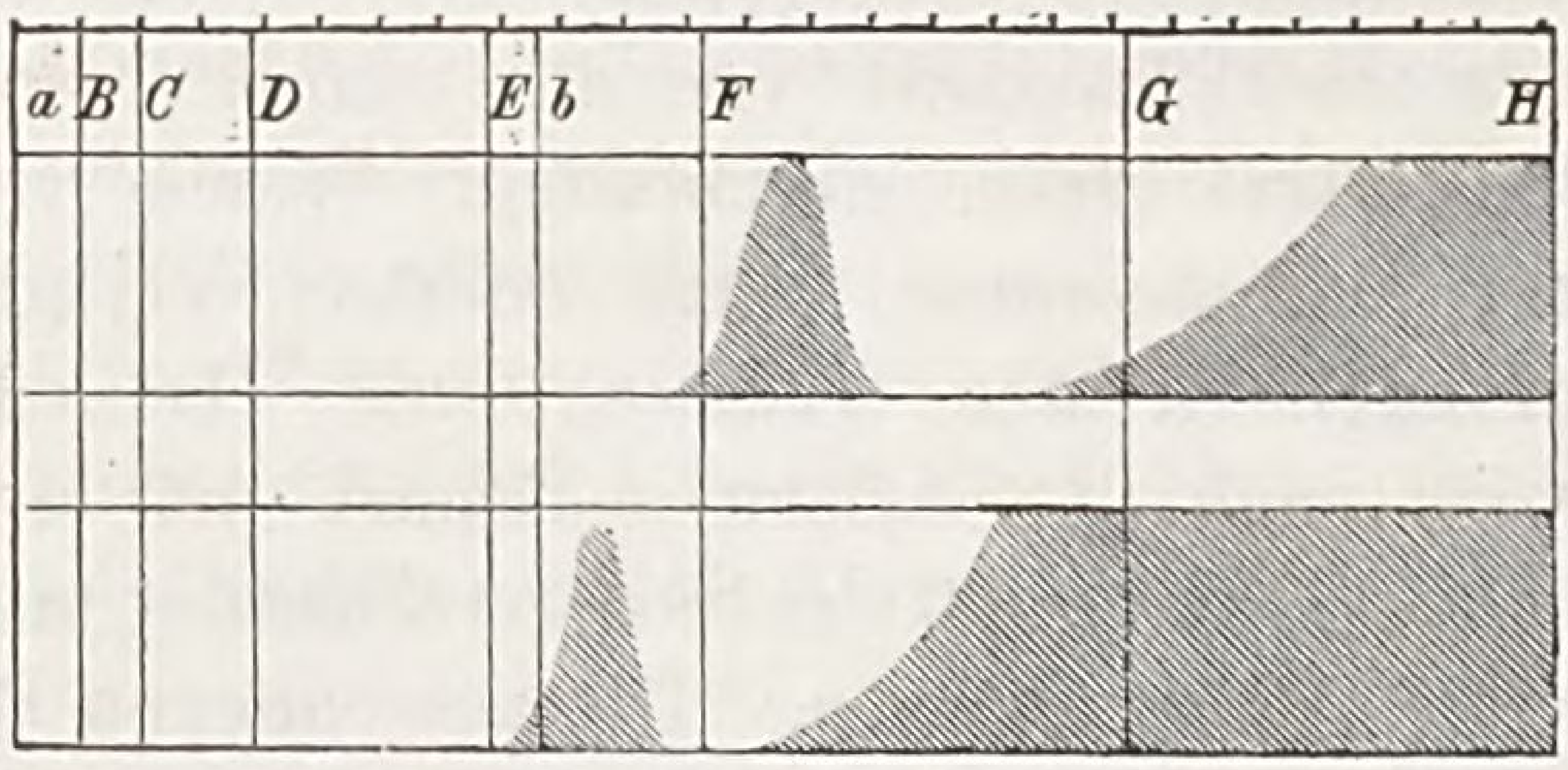


Fig. 5.

Das Rhodophan scheint in Petroläther gar nicht, in Aether kaum löslich zu sein und ist in CS_2 sicher ganz unlöslich, wenn kein Fett zugegen ist. In der mit Seife verunreinigten Masse, als welche es erhalten wird, löst sich das Rhodophan am leichtesten in Terpentinöl und in Alkohol, mit schöner, rosenrother bis tieferer Purpurfarbe, besonders leicht in Alkohol dem einige Tropfen Eisessig zugesetzt worden. Diese Lösungen verschiessen und entfärben sich im Dunkeln nach einigen Stunden. Die Lösung in Benzol ist schön rosa und, wie es scheint, im Dunkeln unbegrenzt haltbar. Wie

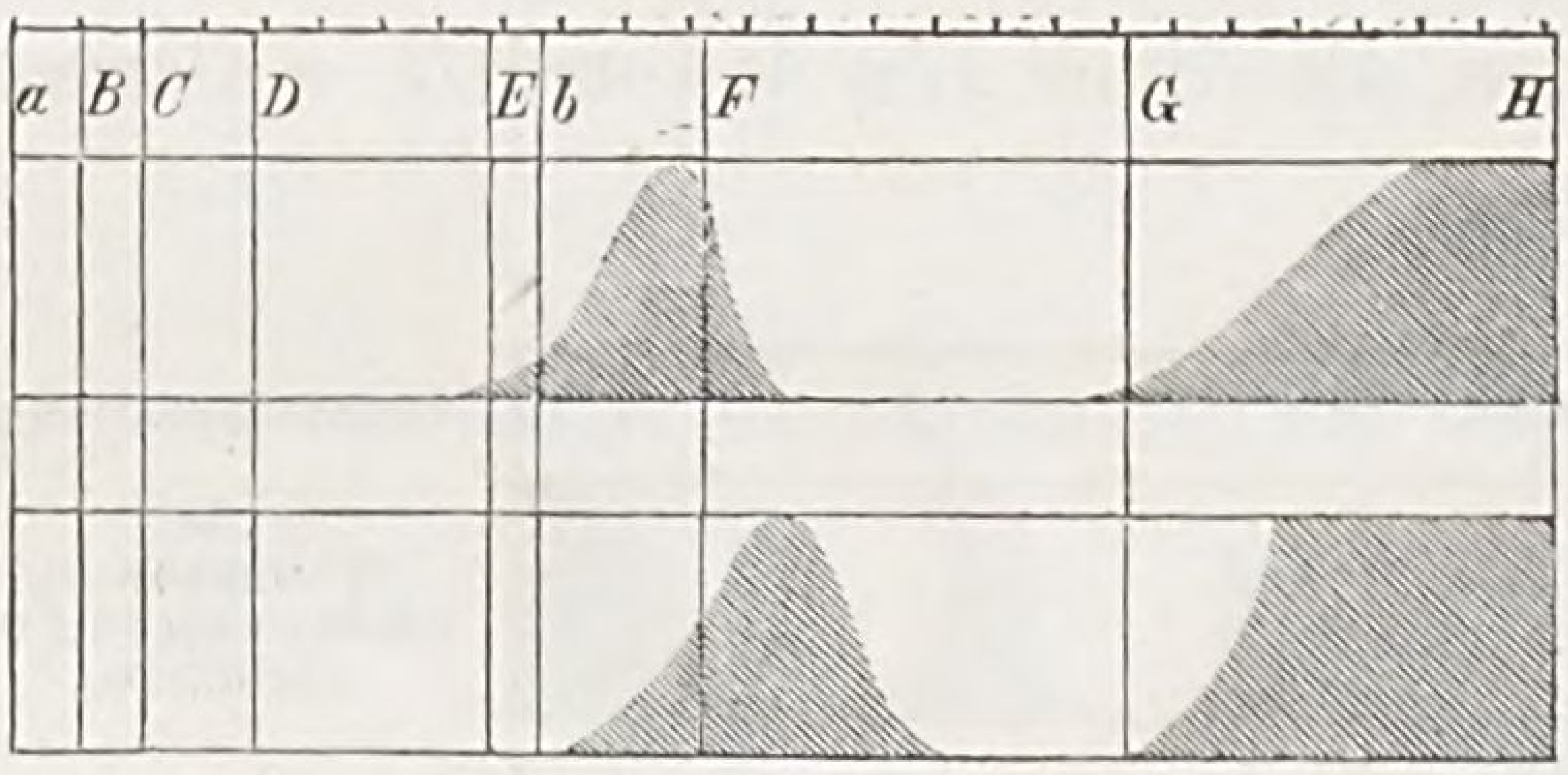


Fig. 6.

die Spectra (Fig. 6 *A B*) zeigen, sind die Lösungen in Benzol und in Terpentinöl nicht nur durch die Sättigung unterschieden.

b) Allgemeines Verhalten der Cromophane.

Da das Darstellungsverfahren dieser Pigmente wegen der nothwendigen Verseifung als ein eingreifendes bezeichnet werden muss, sind Garantien gegen den Verdacht auf Veränderungen der beschriebenen Stoffe als Beweise für ihre Präexistenz zu suchen. Dieselben würden sehr vollkommen sein, wenn die bunten Oelkugeln der Netz-

haut in situ unmittelbarer spectroskopischer Untersuchung zugänglich wären. Darauf schon seit lange gerichtete Bemühungen, über welche gegenwärtig wegen der ungeeigneten Construction der käuflichen Mikrospectroskope nicht hinauszukommen war, haben nur im Allgemeinen constatirt, dass die Kugeln der Vogelretina das brechbarste Licht am meisten absorbiren.[1] Augenblicklich bietet die Betrachtung frischer Netzhäute mit guten, achromatischen Mikroskopen die besten, durch kein farbengeübtes Auge beanstandeten Garantieen für die Uebereinstimmung der isolirten Chromophane mit den natürlich vorkommenden, denn das Aussehen der Oelkugeln bei Tauben und Hühnern entspricht jenen zum Theil vollkommen, besonders in Betreff der grünlichgelben Nuance des Chlorophans und der reinen Orangefarbe des Xantophans. Zeigen einzelne der damit gefärbten Kugeln Abweichungen, so liegen dieselben augenscheinlich in Differenzen der Sättigung. Nur das Rhodophan tritt in der Retina grösstentheils nicht in voller Reinheit auf, da die es enthaltenden Kugeln mehr rubinroth, als purpurn zu nennen sind. Wo das Pigment fein vertheilt in den Zapfeninnengliedern nach vorn verbreitet vorkommt, zeigt es jedoch die Purpurfarbe deutlicher, ebenso zuweilen in den grösseren Kugeln stark belichteter Netzhäute. Das Rhodophan kommt hiernach vermuthlich meist gemischt mit etwas Xantophan in den Oelkugeln vor. Die Präexistenz der Chromophane wird weiter erhärtet durch die von Schwalbe an den Oelkugeln gefundene Jodreaction, denn dieselbe fällt in dem Grade intensiver aus, je tiefer die Kugeln gefärbt sind, an den gelbgrünen und orangen grünlichblau, an den rothen dunkler, grünlicher und ist von derselben schmutzigeren Nuance besonders in den diffus gefärbten Innengliedern der Taube. Vollkommen das Gleiche ist an den 3 isolirten Chromophanen zu sehen, wo die Reaction am besten nach schwachem Ansäuern mit Essigsäure, durch Mischungen von Jodkalium mit alkoholischer Jodlösung, nur schneller und intensiver als an den Oelkugeln, deren Fett etwas hinderlich ist, erhalten wird.

Nach Capranica[2] färben sich die bunten Oelkugeln der Netzhaut und das daraus extrahirte alle 3 Chromophane in Mischung enthaltende Fett mit concentrirter Salpetersäure und mit Schwefelsäure dunkelgrünblau bis blau. Das Chlorophan und das Xanthophan werden mit Salpetersäure, die salpetrige Säure enthält, blaugrün, mit concentrirter Schwefelsäure dunkelblau, während das Rho-

1 Talma, Onderz. g. i. h. physiol. Lab. t. Utrecht III. II. R. S. 259.
2 Capranica a. a. O.

dophan durch erstere nur sehr langsam blass blaugrün, durch letztere erst schwarzblau, dann dunkelbraun wird.

Die Chromophane besitzen, abgesehen von der Veränderlichkeit im Dunkeln, die sich auch an dem isolirten Chlorophan und Xanthophan geltend macht, einen gewissen Grad von Lichtempfindlichkeit, der zwar nicht entfernt mit dem des Sehpurpurs zu vergleichen ist, aber dem des Lipochrins und Luteïns nahe steht, ohne diesen übrigens zu erreichen. Ausser in alkoholisch-ätherischen und Fettlösungen oder in Benzol macht sich die Lichtempfindlichkeit auch an den wenig Seife enthaltenden, trocknen oder damit durch Galle in wässrige, sehr verdünnte Lösung gebrachten Pigmenten geltend. Im besten Falle werden sehr dünne Schichten des Chlorophans an direktem Sonnenlichte in einigen Stunden farblos, solche des Xanthophans etwa in der 3fachen, des Rhodophans kaum in der 20fachen Zeit. Wie Mays fand, bleichen in CO_2 trocken eingeschlossene Taubennetzhäute nicht oder ungemein langsam im Vergleiche zu in Luft exponirten. Diese Lichtbleiche ist also wie die des Fuscins vom Sauerstoff abhängig und dürfte auf einem Oxydationsprocesse beruhen.

Ozon entfärbt die Chromophane im Dunkeln, das Chlorophan am schnellsten, das Rhodophan sehr langsam.

Anhang: Retinale Farbstoffe der Wirbellosen.

Im Auge der Wirbellosen sind Pigmente so häufig und bei den niederen Formen so charakteristisch, dass farbige Anhäufungen an lichtzugänglichen Stellen gern für Augen unvollkommenster Entwicklung genommen werden, wo nur irgend Andeutungen von Sehvermögen vorliegen.

Bekannt und leicht zu untersuchen sind die grossen purpurn bis violet gefärbten Sehstäbe von Astacus fluviatilis. Dass diese Farbe nicht von Sehpurpur herrühre erhellt schon aus dem Umstande, dass man sie ohne allen Lichtschutz stundenlang untersuchen kann und aus der Constanz ihres Vorkommens sowohl bei dunkel gehaltenen, wie bei lange besonnten oder in der Sonne abgestorbenen Krebsen. In dünnem Salzwasser zerlegte Krebsaugen verlieren die Stäbchenfarbe bei 47° C. im Dunkeln, aber auch bei mittlerer Temperatur nach dem Zugiessen gesättigter NaCl-Lösung. Der violette Farbstoff ist in Galle löslich und geht sammt dem den Stäben anhaftenden, schwarzen Pigmente durch das Filter. Hat sich das ungelöste Pigment nach einigen Stunden abgesetzt, so findet man darüber stehend eine schön violette, klare Flüssigkeit, welche ihre Farbe erst nach vieltägiger intensivster Besonnung verliert, ohne zuvor gelb zu werden.

Unter den Sehstäben der Insecten sind nur die von Locusta viridissima im hier interessirenden Sinne berücksichtigt, von denen Chatin[1]

1 Chatin, Compt. rend. XXV. p. 447.

irrthümlich angegeben hatte, dass sie der Retinafarbe des Frosches vergleichbar empfindliche Färbung besässen; dieselbe ist in Wahrheit nicht weniger indolent, als die der Krebse.[1]

Die vor allen späteren Erfahrungen bei den Cephalopoden von KROHN entdeckte Rosenfarbe der Stäbchen ist nach KRUKENBERG's[2] Untersuchungen entweder gar nicht oder in äusserst geringem Grade durch Licht veränderlich. Lebende Exemplare von Loligo und von Sepia, 1—2 Stunden mit dem Auge gegen die Mittagssonne gerichtet, zeigten die Stäbchenfarbe so gut, wie die im Dunkeln gehaltenen, und es wich dieselbe auch im herausgenommenen und abgestorbenen Auge der Sonne nicht. Doch schien KRUKENBERG die Farbe nicht ganz constant, da im Lichte abgestorbene Sepiolae sie zuweilen zeigten, zuweilen nicht. Rosa Netzhäute von Sepiola behielten die Farbe längere Zeit in NaCl von 2—30 pCt., in Natriumphosphat und -sulphat, und in Benzol. NH_3 löste den Farbstoff unverändert, während derselbe durch Alkohol, Glycerin und Chlorbarium, HCl von 2 p. m., Essigsäure von 5 pCt., Oxalsäure von 4 pCt., Kupfersulphat und Sublimat zerstört wurde. Durch Galle ist das Stäbchenrosa in NaCl gelegener Cephalopodenaugen nicht extrahirbar.

Die schwarzen und rothen Pigmente im Fliegenauge werden durch wochenlanges Besonnen deutlich gebleicht. Das tief schwarzviolette Pigment des Auges von Helix pomatia verliert unter derselben Bedingung die violette Beimischung. Dagegen zeigt das zwischen den Sehstäben des Hummers befindliche, schwarzviolette Pigment, auch in dünnster Schicht ausgemalt, nach sommerlangem Belichten nicht die geringsten Unterschiede zwischen bedeckt und unbedeckt gehaltenen Stellen.

ZWEITES CAPITEL.

Veränderungen der Netzhaut beim Sehen.

Wie fein unser bewusstes Empfinden Erregungsvorgänge der Sinnesorgane zu erkennen und ermessen gestattet, so bleibt doch alle in dieser subjectiven Weise geführte Untersuchung der Empfindung unvollständig und einseitig bis zu dem Augenblicke, wo dieselbe mit der Feststellung objectiv erkennbarer Vorgänge an dem erregten Organe zu verbinden ist. Beim Hörsinne wurden bekanntlich zuerst durch die auf Töne erfolgenden, sichtbaren Vibrationen feiner Härchen am Gehörorgane von Mysis objective Zeichen des Beginnes der Empfindung von V. HENSEN[3] entdeckt, beim Sehsinne durch die von HOLM-

1 W. KÜHNE a. a. O. I.
2 C. FR. W. KRUKENBERG, Unters. aus dem physiol. Instit. z. Heidelberg II. S. 58.
3 V. HENSEN, Ztschr. f. wissensch. Zool. XIII. S. 319.

gren[1] nachgewiesenen Aenderungen des electromotorischen Verhaltens der Netzhaut im eröffneten und halbirten Auge unter dem Einflusse mässigen Lichtes. Ist an dem Zusammenhange der Retinaströme mit dem Sehepithel noch zu zweifeln, bevor nicht deren vielleicht ausschliessliche Beziehung zur grauen Substanz der Netzhaut, also zum Leitapparate des peripheren Sehorganes klar gestellt worden, so liefert die schon genannte wichtige Entdeckung Boll's[2], dass die Netzhaut im intensiv belichteten Auge des lebenden Frosches blasser, im länger geblendeten farblos wird, eine Thatsache objectiver Natur, welche während des Sehens entstandene Veränderungen in den Sehzellen bezeugt.

Seit den im vor. Cap. gegebenen Beweisen der ausschliesslichen Abhängigkeit der Purpurbleiche an der isolirten Netzhaut vom Lichte, kann an ein grundsätzlich anderes Verhalten des Sehpurpurs im lebenden Auge um so weniger gedacht werden, als wir denselben hier ebenfalls durch kein anderes Mittel vertreiben können, wie durch das Licht. Namentlich sind alle mechanischen und electrischen Wirkungen, die bekanntlich starke Netzhauterregung mit lebhafter Lichtempfindung erzeugen, am Auge lebender Thiere ohne jeden Einfluss auf dessen Purpur: wenn wir die Farbe gebleicht finden, so ist nur auf das Licht, als die primäre Ursache, nicht auf irgend welchen vom Lichte zuvor erzeugten, nervösen Erregungsvorgang, in dessen Folge der Purpur bleiche, zu schliessen. Die freilich sehr bedeutenden, vornehmlich am lebenden Froschauge, im Gange der Lichtbleiche bemerklichen Abweichungen von dem bisher für die isolirte, überlebende oder abgestorbene Netzhaut berichteten Verlaufe, bedürfen deshalb noch einer besonderen Erklärung; dieselbe folgt im II. Abschnitte dieses Capitels.

I. Photochemische Zersetzungen in der sehenden Netzhaut.

1. Verhalten der Stäbchen.

Um trotz der Präparation vor Natronlicht farblose Netzhäute zu finden, genügt es dieselben dem Auge eines 10—15 Minuten gegen die unbedeckte Sonne gehaltenen Frosches oder eines mit erweiterten Pupillen, einige Zeit mit freier Umschau am ungehinderten Tageslichte verweilenden Kaninchens zu entnehmen. Diffuses gutes Tageslicht pflegt im Freien lebende Frösche etwa in 30 Minuten des Purpurs

1 Holmgren a. a. O.
2 Boll, Monatsber. d. Berliner Acad. und Acad. d. Lincei — a. a. O.

zu berauben, in geschlossenen Räumen viel langsamer, oder gar nicht, wie z. B. in unsern Breiten zur Zeit der winterlichen Sonnenhöhe, bei einer sonst für alle gewöhnlichen Beobachtungen ausreichenden Helligkeit; die Netzhaut wird dann höchstens reinroth, chamois oder gelb gefunden.

Optographie. Die Retina wird im lebenden oder im abgestorbenen Auge in situ erhalten, ganz wie die isolirte, nur soweit gegebleicht, als das Licht sie trifft und mit so vollkommener Begrenzung der Wirkung, dass die von den brechenden Medien auf dem Augengrunde entworfenen Bilder, wenn sie scharf sind, auch scharfe helle bis farblose Zeichnungen in der purpurnen Fläche der Stäbchenschicht, also Photographieen oder Optogramme hinterlassen. Diese schönen und messbaren graphischen Darstellungen des gesehenen Lichtes liefern den vollkommensten Beweis für dessen directe und locale Wirkung auf den Purpur, welche jeden Gedanken an etwaiges Schwinden des Farbstoffes durch allgemeinere Effecte, wie Resorption und dergl. fern hält und gewähren zugleich das beste, meist unentbehrliche Mittel, um über die wichtigsten Einzelheiten des photochemischen Processes zu entscheiden. An einigermaassen frischen, ausgeschnittenen Kaninchen- oder Rindsaugen erhält man die Bilder leicht durch Exponiren auf dem Grunde eines cylindrischen, innen geschwärzten Kastens von 50 Ctm. Durchmesser und 25 Ctm. Höhe, der mit einer matten Glastafel bedeckt ist, auf welcher 4 — 5 Ctm. breite und ebensoweit von einander entfernte Streifen schwarzen Papiers das Object bilden. Die Belichtung geschieht am freien Himmel, oder unter einem guten Oberlichte, je nach der Helligkeit während 2—7 Minuten, worauf die Netzhaut, vor Natronlicht, entweder sogleich unter Salzwasser, oder nach 24 stündigem Liegen des halbirten Auges in Alaun von 4 pCt. abgehoben und flottirend oder nach dem Abtrocknen auf die glasirte, convexe Seite eines Porzellanschälchens gespannt am Tageslichte betrachtet wird. Weniger sicher aber zu manchen Zwecken genügend erhält man Optogramme, indem man das Auge einfach unter ein Oberlicht mit breiten Rahmen, oder schräg gegen den Himmel gerichtet, in Entfernung von 1—2 Metern einem beliebigen Fenster mit breiten Pfosten, zugewendet aufgestellt, plötzlich enthüllt und später wieder verdeckt.

Optographische Methode. Zur Gewinnung im Leben entstandener Optogramme empfiehlt sich ein fensterloses Zimmer, das nur mit einem Oberlichte versehen ist, welches in Gestalt eines Lichtschachtes bis auf etwa 30 Ctm. gegen den Arbeitstisch hinabragt und unten durch eine matte Glastafel geschlossen ist. Einige Rahmen

und Falze gestatten hier Scheiben mit schwarzen Figuren, nach Bedürfniss farbige Gläser und eine Holzplatte zum raschen Enthüllen und Verdecken des Objectes einzuschieben. Die zweckmässigen Maasse



Fig. 7. *A* Netzhaut eines im Dunkeln gehaltenen Kaninchens. *a* die ausgebohrte Papille, *b b* weisser Streif markhaltiger Nervenfasern mit schwach angedeuteten Blutgefässen, darunter die am intensivsten purpurn gefärbte Sehleiste. — *B C* Kaninchennetzhäute mit Optogrammen, in *B* von einem Fenster, dessen unterste Scheibenreihe verdunkelt werden, *C* von einem 4 Meter entfernten Oberlichte. — An Präparaten, die auf Porzellanschälchen aufgetrocknet worden (vergl. Fig. 8), ist der weisse Streif kaum zu erkennen, weil die Netzhaut hinter demselben mit einer continuirlichen Schicht purpurner Stäbchen bedeckt ist.

der Einrichtung sind: obere Oeffnung des Lichtschachtes auf dem Dache, mit schräg nach Süden gerichteter klarer Glasscheibe, 65 Ctm. breit, 88 Ctm. lang, Höhe des Schachtes = 280 Ctm., untere Oeffnung von 45 und 55 Ctm. Seite, mit 5 hellen und 4 undurchsichtigen Streifen von je 5 Ctm. Breite. Der Lichtschacht ist innen weiss, der Arbeitsraum überall matt schwarz gestrichen und nur von Natronflammen erhellt. Unter dem Mittelpunkte des Objectes befindet sich eine Marke auf dem Arbeitstisch, nach welcher Kopf und Auge des Thieres zu orientiren sind. Kaninchen sind zu den Versuchen am bequemsten. Man befestigt sie in bekannter Weise und fixirt das Auge, dessen Corneascheitel 25 Ctm. unter dem Mittelpunkte des Objectes stehen soll, wenn ohne Curare und künstliche Respiration, die oft entbehrlich sind, gearbeitet wird, durch 2 in die Conjunctiva und durch einen in das knorpelige Lid gelegte Fäden, die an passenden Vorsprüngen des Kopfhalters befestigt werden. Wo die Fäden nicht zur Verwendung kommen, ist das Auge durch einen Lidhalter zu öffnen. Je nach der Lichtintensität (nur directes Sonnenlicht ist ausgeschlossen) und nach der Pupillenweite, welche in den meisten Fällen, auch zur Vermeidung accommodativer Aenderungen, mit Atropin maximal gemacht wird, genügen 10 Secunden bis 7 Minuten zur Erzeugung des Bildes. (v. Fig. 8.) Nach beendigter Aufnahme wird das Thier geköpft und das Auge der schon mitgetheilten Alaunbehandlung unterworfen. Um die Bilder länger zu conserviren, hält man sie etwa 8 Tage im Dunkeln trocken, worauf die Färbung des entstehenden Sehgelb



Fig. 8. Optogramm auf der Netzhaut des Kaninchens von einer mit schwarzen Streifen belegten matten Glasscheibe.

wenigstens, bald so echt wird, dass sie kaum mehr am Lichte verschwindet.

Optographie am Frosche. Wegen der geringeren Kostspieligkeit des Materials und wegen mancher nur an Thieren mit grossen Stäbchen zu entscheidenden Fragen ist es nöthig locale Ausbleichungen auch am Froschauge vornehmen zu können. Besondere Schwierigkeiten liegen hier in den geringen Vortheilen, welche die Alaunhärtung erzielt, in der erforderlichen langen Belichtung und in der durch die Belichtung erschwerten Entfernung des Pigmentepithels von der Stäbchenschicht. Wie gross der letztere Uebelstand sei, erhellt schon aus BOLL's erster Angabe, dass die Netzhaut aus belichteten Froschaugen in Folge einer Consistenzveränderung überhaupt nur in schwarzen Fetzen herauszubekommen sei[1]; es war daher vor Ueberwindung dieser Klippe ganz unmöglich die localisirte Lichtwirkung an diesem Objecte nachzuweisen.

Durch folgende Mittel wird den genannten Missständen begegnet; 1. um die Netzhaut unzerrissen hervorzubringen genügt Abschneiden der Verwachsung des Opticus mit der Sclera, wie es seit der Feststellung des Verhaltens der isolirten Retina gegen Licht jetzt allgemein geübt wird. Die am Aequator, im halbirten Auge gefasste Retina lässt sich dann immer, sei es mit oder ohne Epithel, unbeschädigt herausziehen, da sie auch durch Belichtung keineswegs erweicht. 2. um das Haften des schwarzen, natürlich jedes Bild verdeckenden Epithels, an der belichteten Stelle zu vermeiden, wird entweder das Bild so klein gemacht, dass die Epithelzellen hier noch im Zusammhange mit der ganzen übrigen nicht haftenden Epitheldecke im Bulbus zurückbleiben, oder es werden Mittel angewendet, welche das Haften nicht aufkommen lassen. Zum ersteren genügt Kleinheit oder grosse Entfernung des gesehenen Objectes, indem man als solches z. B. eine Gasflamme oder ein gut beleuchtetes Quadrat aus mattem Glase von etwa 3 Ctm. Seite und 40 Ctm. Entfernung verwendet, zum zweiten sehr langsame Bleichung in 1—2 Stunden bei schwachem Lichte, oder als das beste aller Mittel, das, wenn nicht gerade rothe Beleuchtung verwendet wird, immer anschlägt, nämlich Erzeugung von Oedem, indem man die ohnehin zu curaresirenden Frösche zuvor längere Zeit in Wasser legt, was die Trennbarkeit des Epithels von den Stäbchen ausgezeichnet befördert. Ist das Oedem gut entwickelt, so genügt es in dieser Beziehung selbst für directes Sonnenlicht, so dass man versucht wird zu glauben, es könne zur Erzielung

1 Vgl. BOLL, Monatsbl. d. Berliner Acad. 1878. 11. Jan.

von Optogrammen innerhalb der beim Frosche kurz zu nennenden Zeit von 10 Minuten dienen. Leider ist dies nicht der Fall, denn wenn man einen solchen Frosch in einem übrigens verdunkelten Zimmer, in welches durch den fast geschlossenen Laden nur ein verhältnissmässig schmaler Lichtstreif fällt, gegen die Sonne wendet und das Thier auch möglichst constant in dem mit der Erde bewegten Lichtstreif liegend erhält, so ist die Ausbleichung immer eine äusserst diffuse, die keinen Schluss auf locale Wirkung des Lichtes in der lebenden Netzhaut zulässt. Im Allgemeinen ist daher beim Frosche die Regel festzuhalten, viel Zeit an den Versuch zu wenden und mit gedämpftem Lichte zu arbeiten. Der Erfolg ist dann ein vortrefflicher.

Bei den Optogrammen des Froschauges giebt es eine beachtenswerthe Quelle von Täuschungen darin, dass oft weisse, scharf begrenzte Stellen in der Netzhaut nicht durch Bleichung, sondern durch Ausreissen und Zurückbleiben der farbigen Stäbchen am Epithel des Augengrundes entstehen. Man erkennt solche Pseudooptogramme ohne Mühe mikroskopisch, an dem ausschliesslichen Vorkommen der Zapfen innerhalb der farblosen Stellen, während die echten Optogramme dort überall regelmässigen Besatz mit farblosen Stäbchen zeigen, unter denen auch keine grüne vorkommen, was beiläufig auch für diese den localen Einfluss des Lichtes beweist. Gute Optogramme sind oft so scharf, dass die Figuren noch bei 100facher Vergrösserung kaum diffus berandet erscheinen. Bei der Säugernetzhaut giebt die mikroskopische Untersuchung einiger mit der Flachscheere, von der Rückfläche der weissen Stellen entnommener Stücke, auch an Alaunpräparaten vollkommen Sicherheit, dass der dichte Stäbchenrasen überall erhalten ist.

Die Optogramme. Die vorerwähnten Objecte von 5 Ctm. Breite liefern im Kaninchenauge bei 25 Ctm. Entfernung scharfe Bildstreifen von 1,5 mm., im Froschauge bei 15 Ctm. Abstand im Centrum der Retina solche von etwa 0,6 mm. Breite. War richtig exponirt, so ist die Breite der hellen Streifen gleich der der dunklen, nach Ueberexposition diese kleiner als jene, so dass die dunklen zuletzt kaum mehr bemerkbare, ganz schmale, verwaschene gelbe Linien darstellen. Deshalb eignet sich das genannte Streifenobject zur Optographie besser, als viele andere und verdient namentlich den Vorzug vor Schachbrettmustern, deren Bilder zwar zu erhalten, aber nach falscher Exposition oft schwer zu finden sind.

Da die Kaninchennetzhaut eine Sehleiste besitzt, welche entweder in den Stäbchen concentrirteren Purpur oder längere Stäbchen besitzt, deren Ausbleichung mehr Zeit oder intensiveres Licht als die Umgebung erfordert, so lässt sich hier der Gang des photochemischen Processes besonders gut beurtheilen, indem man die Unterschiede der Bilder auf und neben der Leiste beachtet. Dieses Vor-

theiles wegen empfiehlt es sich das Optogramm stets so anzufertigen, dass die Bildstreifen die Sehleiste kreuzen, das Streifenobject also senkrecht zum Netzhauthorizonte einzustellen. Ausserdem ist es gut die Kopfaxe so zu drehen, dass der grössere Theil des Bildes auf die unter dem Horizonte der Netzhaut befindliche, homogenere und besser als die obere, überdies mit dem Balken markhaltiger Nerven versehene, gefärbte Fläche fällt.

In der lebenden Netzhaut geht die Verfärbung des Sehpurpurs durch ähnliche Stufen, wie an der isolirten Membran oder an der Purpurlösung: sie wird reinroth, ziegelroth, orange, rosa, chamois, gelb, bevor sie ganz farblos wird. Die erste Spur des Optogramms ist daher eine diffuse, nur an der Richtung der Streifen kenntliche, rothe Zeichnung auf purpurnem Grunde; ganz im Anfange, bei bestem Lichte, schon nach Exposition von 5 Secunden, ist nur ein Streif im Centrum so angedeutet, während nach 10 Secunden bereits mehrere erscheinen. Auf der Sehleiste sind diese Bilder noch nicht bemerkbar. Ist das Bild orange, so zeigt die Sehleiste entsprechend reinrothe Flecke, ist es rosa, so beginnen orange gezeichnete Stellen auf der Leiste u. s. w.; es ist also die Leiste immer etwa um eine Stufe neben der Fläche im Rückstande. Scharf wird die Zeichnung erst beim Uebergange von orange zu rosa, dann aber oft schon so, als ob die Grenzen mit dem Lineal gezogen wären. Die Lichtwirkung ist im Kaninchenauge so localisirt, dass ein Bild mit völlig farblosen Streifen, nicht rothe oder orange, sondern purpurne Zwischenbänder zeigt, wenn richtig exponirt worden. Reinrothe, statt purpurner Streifen, neben farblosen zeigen also den ersten Grad der Ueberexposition an, der endlich auf der Fläche schon zu finden ist, wenn die Exposition für die Leiste gerade richtig gewesen. Die weiteren Uebergänge von der Ueberexposition bis zur vollkommenen Verwischung des Bildes bedürfen keiner Erörterung; je nach der Lichtintensität und Pupillenweite erscheinen solche Bilder von der 45. bis 120. Secunde der Expositionszeit an.

Da die letzte Farbenspur auf der Kaninchennetzhaut in den am Tageslichte erzeugten Optogrammen stets gelb ist, kann man auch für das lebende Auge, in welchem die Sehfarbstoffe kaum in ein indolentes Stadium treten dürften, nicht zweifeln, dass das Sehgelb etwas weniger lichtempfindlich ist, als der Sehpurpur.

Wirkung des farbigen Lichtes auf die lebende Netzhaut.

Nach den ersten von Boll an lebenden Fröschen vorgenommenen farbigen Belichtungen sollte kein monochromatisches Licht die

Retina völlig entfärben, ein Theil sie wenig, ein anderer sie stark verändern, jedes sie in charakteristischer Weise verfärben und nur das weisse Licht sie vollkommen bleichen.[1] Seit aber erwiesen worden, dass die isolirte Netzhaut nicht durch Absterben, sondern durch Licht und auch durch farbiges vollkommen bleicht[2], wurde von Boll das letztere wenigstens für grünes, blaues und violettes Licht auch dem lebenden Auge zugestanden und nur für die Vorstadien der Entfärbung, charakteristische, namentlich nach Verwendung des brechbareren Lichtes, an dessen Farben erinnernde Nuancirung behauptet. Das blaue Licht sollte, gleichviel ob durch Absorption oder durch Brechung im Spectrum erhalten, das wirksamste sein, also das grüne unter allen Umständen an Einfluss übertreffen, gelbes und rothes allein keine Entfärbung erzeugen, indem das gelbe die Eigenfarbe der Netzhaut erhalte, das rothe die seitdem von Boll im Dunkelauge für reinroth genommene Normalfarbe, zu bräunlichem Purpur vertiefe.[3]

Beleuchtungsmittel. Da farbiges Licht nicht von derselben Intensität, wie weisses gemischtes Tages- oder Sonnenlicht zu haben ist, so bedarf das Auge hier bis zur erkennbaren Veränderung der Netzhaut, vollends bis zur Bleichung, bedeutend längerer Exposition, als in den bisher genannten Fällen. Ohne directes Sonnenlicht, dessen es zur Darstellung objectiver Spectra ohnehin bedarf, sind derartige zum grossen Theile mit Absorptionsfarben vorzunehmende Versuche kaum anzustellen. Für den Zweck genügend reine Absorptionsfarben werden durch farbige Gläser oder durch Flüssigkeiten erhalten, Roth mittelst des gewöhnlichen durch Kupferoxydul gefärbten Glases oder durch Lösungen von Pikrinsäure mit Carminsäure, auch durch passend verdünntes Blut, Grün durch mit Chromoxyd gefärbtes Glas, oder mittelst hintereinander folgender Schichten von Kupfervitriol und Pikrinsäure, Blau und Violet durch Kupferoxydammoniak. Blaue Gläser, die nicht bedeutende Mengen Roth durchliessen, sind nicht käuflich, ebensowenig gelbe, die anderes Licht gehörig ausschlössen. Durch Absorption sind also nur Roth und Grün brauchbar zu erhalten, Blau nur gemischt mit Violet und ausschliesslich durch Flüssigkeiten. Für das Gelb bleibt die Natronflamme, deren Intensität, wenn sie ausser den gelben D-Linien kein diffuses Spectrum geben soll, freilich zu wünschen lässt, übrig. Vor dem Gebrauche sind die Absorptionsfarben auf ihre Reinheit zu prüfen, indem man das maximale im Laufe des Versuches mögliche Licht, meist directes Sonnenlicht, nach seinem Durchgange durch die Absorbenten spectroskopisch prüft. Bei den Spectralfarben erwächst aus der theilweise geringen Intensität, wenn ihr Licht einigermaassen monochromatisch sein soll, eine besondere Schwierigkeit. Ausser der gewünschten Farbe sind alle Theile des Spectrums

1 Boll, Accad. d. Linceï. 6. Jan. 1877.

2 Vgl. Kühne, Zur Photochemie der Netzhaut. 5. Jan. Heidelberg 1877.

3 Boll, Monatsber. d. Berliner Acad. 1877. 11. Jan. und Arch. f. Anat. u. Physiol. a. a. O.

vollkommen abzublenden und es müssen die durch das Diaphragma fallenden Strahlen noch mit einer Convexlinse so gebrochen werden, dass ihre lineare Vereinigung etwa in den vorderen Brennpunkt des Auges fällt, um auf der Netzhaut ein schmales, bandartiges Bild und ein entsprechendes Optogramm zu erzeugen. Zu diesen Versuchen wurden bis jetzt nur mit Curareödem behaftete Frösche geeignet gefunden.

Wirkung der langwelligen Strahlen. Das rothe, den Sehpurpur am wenigsten zersetzende Licht ist gleichwohl fähig die Netzhaut des lebenden Auges vollkommen zu bleichen. Es muss nur intensiv genug sein. Setzt man normale Frösche im Hochsommer unter mehrere Lagen rothen Glases, welches von directem Sonnenlichte nur die Strahlen von *A* bis *C* für unser Auge kenntlich durchlässt, so werden ihre Stäbchen ohne Ausnahme nach etwa 2 Stunden gänzlich entfärbt gefunden. Die Netzhaut kommt darauf freilich vom Epithel gleichmässig bezogen, als sammetschwarzes Häutchen zu Tage, an welchem nur die mikroskopische Betrachtung von der Rückfläche die Stäbchen in grosser Zahl, als farblos glänzende Stifte durch den braunen Pigmentbrei nach hinten ragend erkennen lässt. Wo es gelingt das Epithel vor weiterer Belichtung am unschädlichen Natronlichte stellenweise abzuschaben und grössere Stäbchengruppen intact zu erhalten, erweisen sich diese als ganz farblos. Um die Epithelschicht leichter abzutrennen, giebt es kein anderes Mittel, als Erwärmung stark ödematöser Frösche während der Rothbelichtung auf mehr als 30° C., was durch mässiges, mit dem Thermometer überwachtes Kühlen der sich in der Sonne bis zur Erzeugung der Wärmestarre erhitzenden Belichtungsgefässe erzielt wird.

Die Netzhaut erwärmter und ödematöser Curarefrösche trennt sich zwar in allen Fällen leicht von der Epithelschicht, wird aber besonders nach rother Belichtung damit nicht ganz pigmentfrei, da zwischen den Stäbchen noch mit Fuscinnadeln versehene, abgerissene Fortsätze der Epithelzellen stecken. Dies ertheilt der entfärbten Stäbchenschicht leicht ein graues und schmutziges Ansehen, an welchem die Stäbchen selbst ganz unbetheiligt sind. Wird die Rothbelichtung nach 1 oder 1 $^1/_2$ Stunden unterbrochen, so ist dieses Verhalten des Pigmentepithels bereits ebenso ausgeprägt, während sich die Netzhautfarbe noch mehr oder minder erhalten, aber natürlich im Anblicke der ganzen Membrana zum Braun vertieft zeigt. Mikroskopisch durch die lange Axe betrachtet ist hier an den Stäbchen immer nur Aufhellung der Farbe zum reinen Roth, zum Orange, endlich bis zum blassesten Gelb, oder z. B. nach nur $^1/_2$ stündiger Exposition, die gewöhnliche, keineswegs mehr vom Roth abgewendete und zum Violet in erhöhtem Maasse neigende Purpurfarbe zu erblicken. Um dem Ein-

wande zu begegnen, dass das mit dem Erwärmen combinirte Oedem abnorme Zustände bedinge, was gewiss zutrifft, insofern solche Netzhäute leicht Pseudooptogramme bekommen, muss erwähnt werden, dass sämmtliche ebengenannten, das Verhalten der Stäbchenfarbe betreffenden Angaben auch für die durch Schaben vom Epithel z. Th. befreiten Präparate, sowie für die durch das Epithel hindurch betrachteten gelten.

In einzelnen seltenen Fällen stösst man auf Froschaugen, deren Retina nach langem Dunkelaufenthalte reinroth ist, was auf Reste abnormer Weise (vergl. S. 286) intra vitam indolent gewordenen Sehgelbs zu beziehen ist. Um vor solchem sehr vereinzelten, unter vielen Beobachtungen als störend kaum zu vermuthenden Falle ganz gesichert zu sein, genügt es Rothbelichtungen partiell, also optographisch auszuführen, indem man den Frosch mitten unter ein zur Hälfte schwarz verdecktes, rothes Glas legt, und die beiden Netzhauthälften zu vergleichen. Ist ein Unterschied vor vollendeter Bleichung zu bemerken, so besteht er immer in der grösseren Deutlichkeit der purpurnen Nuance und in der Tiefe der Farbe auf der Seite, wo das Epithel leichter zu entfernen ist, also auf der unbelichteten, gegenüber der anderen, wo die einzelnen Stäbchen roth, orange oder gelb sind.

Durch rothes Spectrallicht werden an der Froschnetzhaut bezüglich des Epithels dieselben Veränderungen erzeugt, wie beim Sehen durch rothe Gläser, doch ist das Spectralroth zu schwach, um daneben mehr als Uebergang des Purpurs in Orange zu bewirken.

Im atropinisirten Kaninchenauge erweisen sich die rothen Strahlen ebenfalls schwach wirksam. Da directer Sonnenschein hier zur Erzielung scharfer Resultate unzulässig ist, kann nur im Allgemeinen angegeben werden, dass hellstes diffuses Tageslicht durch eine rothe Scheibe gedämpft, unter den für die Optographie vorhin erwähnten Einrichtungen niemals eher, als nach 30 Minuten Wirkung erzielt. Wird das Object zur Hälfte schwarz verdeckt, so findet man die Netzhaut auf der Bildseite zu dieser Zeit reinroth, auf der andern purpurn, nach etwa 40 Minuten orange, nach 1 Stunde hellgelb. Für die Erkenntniss der wahren Wirkungsweise langwelliger Lichtstrahlen auf den Sehpurpur im Leben, sind diese Versuche besonders maassgebend, weil die hier mit allen Vortheilen verwendbare Alaunhärtung stets völlig pigment- und epithelfreie Netzhäute liefert; durch dieselben wird auf das bestimmteste entschieden, dass dieses Licht durchaus keinen Umschlag zu tieferen Netzhautfarben bedingt, sondern, wenn es wirkt, wie jedes andere nur bleicht und zwar in einer das Sehgelb am meisten verschonenden Weise.

Ueber die Wirkung des gelben Lichtes liegen nur insoweit Er-

fahrungen vor, als man weiss, dass alle Vorbereitungen zu optographischen Versuchen an Fröschen, Hunden und Kaninchen vor Natronlicht beinahe so gut, wie im Dunkeln vorzunehmen sind, was jedoch eine die des rothen Lichtes selbst übertreffende Wirkung nicht ausschliesst. Die Froschnetzhaut monochromatisch mittelst des Spectrums gelb genügend zu beleuchten, scheitert an der ausserordentlich geringen Breite des reinen, weder orange noch grünlich aussehenden spectralen Gelb.

Wirkung der kurzwelligen Strahlen. Die in der Chemie des Sehpurpurs erörterte Bleichungsweise des gelbgrünen, grünen blaugrünen und blauen Lichtes wiederholt sich für die Netzhäute lebender Frösche und Kaninchen mit der einzigen Abweichung hinsichtlich der vom ersten bemerkbaren bis zum letzten totalen Effecte stets erforderlichen längeren Exposition. Vom Gelbgrün und Grün des Sonnenspectrums werden die Netzhäute curarisirter Frösche in $1/2$ bis 1 Stunde, vom Blau in etwa $1\,1/2$ Stunden total gebleicht. Unter grünem Glase einerseits, unter Kupferoxydammoniak andrerseits dreht sich dies Verhältniss ebenso um, wie bei der isolirten Netzhaut (vergl. S. 280) und eine Mischung des gesammten Blau und Violett des Spectrums steht der Wirksamkeit nicht nur des gelbgrünen, sondern auch des reingrünen und blaugrünen Spectralabschnittes so bedeutend nach, dass auch beim Purpur der lebenden Netzhaut von einer Verstärkung des physiologischen Effectes der blauen Strahlen durch Combination mit den violetten kaum etwas zu bemerken ist.

Im lebenden Froschauge sind die von der isolirten Netzhaut bekannten, nach farbiger Belichtung vor gänzlicher Entfärbung entstehenden Bleichungsnuancen ebenfalls, obschon weniger deutlich zu erkennen. Bis zum Grün erzeugt das Spectrallicht als letzte Vorstufe gelbe, im Grün und Blaugrün chamois, im Blau und Violett hellrosa bis lila gefärbte Netzhäute, also mit abnehmender Wellenlänge weniger Sehgelb. Da alles Licht, gemischtes, wie monochromatisches, Epithelpigment zwischen die Stäbchen nach vorn treibt, so werden die Bleichfarben ohne mikroskopische Betrachtung meist braun oder grau, zu Schmutzfarben nuancirt gefunden, welche jedoch den einzelnen Stäbchen niemals zukommen; Charakteristisches für das zur Bleichung verwendete Licht findet sich darin nicht.

Auf Grund aller vorliegenden Erfahrungen kann die Beziehung und Abhängigkeit der Bleichungsnuancen an der Stäbchenfarbe von der Beschaffenheit des zur Wirkung verwendeten Lichtes durch folgende Sätze[1] ausgedrückt werden:

1 Vgl. A. Ewald und W. Kühne, Vom Einflusse des farbigen Lichtes auf den Sehpurpurpur des lebenden Auges a. a. O. S. 395—411.

1) In der isolirten, wie in der lebenden Netzhaut entsteht durch die photochemische Zersetzung des Sehpurpurs nur *ein* farbiges Product; dieses ist das Sehgelb, dessen quantitatives Verhältniss zum noch unzersetzten Purpur die Netzhautfarbe vor Vollendung der Lichtbleiche bestimmt.

2) Wo das Sehgelb ebenso so schnell oder schneller zersetzt wird, als der Purpur (im kurzwelligen Lichte) wird die Netzhaut rosa oder lila, wo das Umgekehrte stattfindet (im langwelligen Lichte) roth, orange, chamois oder gelb.

2. Verhalten der Zapfen.[1]

Wie unerheblich die Lichtempfindlichkeit der Chromophane sein mag, so könnte vielleicht grössere photochemische Zersetzlichkeit derselben in den Oelkugeln des lebenden Vogelauges vorausgesetzt werden, seit Mays den Einfluss des Sauerstoffs darauf entdeckte. In Oxydationen leistet der lebende Organismus so Ueberraschendes, zur Zeit auf chemisch-physikalischem Wege ohne ihn oft Unnachahmliches, dass es auch hier dem Versuche überlassen blieb etwaige Bleichungen im Leben belichteter purpurloser Vogelnetzhäute zu erproben.

Die Pupille der Tauben und Hühner ist so starker Verengung fähig und macht gegen intensives Licht so dauernden Gebrauch davon, dass die leicht zu constatirende Uebereinstimmung im Aussehen der Zapfen geblendeter und dunkel gehaltener Vögel fast vorauszusetzen war. Um von der Pupille unabhängig zu werden, kann das Vogelauge nach Entfernung des dritten Lides und nach Oeffnung der äusseren Lider mit dem Halter, der Cornea beraubt und die Pupille nach dem Ausschlüpfen der Linse durch in die Iris gelegte Miniaturlidhalter, zu einem grossen, quadratischen Loche erweitert werden. Der Glaskörper fliesst aus solchen Augen, so lange sie nicht stark geneigt werden, nicht ab und es besteht darin eine so starke Absonderung, dass auch kein Schutz gegen Verdunstung nöthig wird. Zur möglichst intensiven Belichtung der jetzt direct sichtbaren Retina, wird dieselbe mittelst Heliostat und Sammellinse der unbedeckten Sonne ausgesetzt und mit einem in den Glaskörper getauchten Thermometer diejenige Einstellung der Apparate gesucht, welche keine Gefahren thermischer Reizung befürchten lässt. Die Augen aller Thiere (Vögel,

1 W. Kühne, Fortgesetzte Untersuchungen über die Retina und die Pigmente des Auges a. a. O. II. S. 89.

Kaninchen, Frosch) können so der denkbar intensivsten Blendung unterzogen werden.

Bei der Taube ist der Erfolg, wenn überhaupt einer zu constatiren ist, das Gegentheil des vorausgesetzten. Die Netzhautfarbe vertieft sich und einzelne Farben der Zapfenkugeln werden reiner, als gewöhnlich gefunden. Die gelbgrünen Kugeln neigen mehr zum Grün, die rothen mehr zur reinen Rosenfarbe des Rhodophans, als zu dem bekannteren Rubinroth; an den Xanthophankugeln ist keine Veränderung zu bemerken. In einzelnen Fällen wird eine Einlagerung diffus feinkörnigen, gelbgrünen Farbstoffs in den Innengliedern der Zapfen mit Chlorophankugeln beobachtet, wahrscheinlich eine Neubildung von Chlorophan, bedingt durch den heftigen Lichtreiz, da die Erscheinung an im Dunkeln gehaltenen Tauben und Hühnern niemals gesehen worden.

Beim Bussard (Buteo vulgaris) wurden nach 10tägiger Gefangenschaft im Dunkeln, ausser vielen farblosen Zapfenkugeln, rothe, orange und gelbgrüne von mässiger Farbensättigung gefunden, bei einem vermuthlich gleich alten Exemplare derselben Species, das 11 Tage im hellsten Lichte gehalten, dagegen gar keine farblosen, sondern ausser tief orangen und ausserordentlich dunkelrothen, nur bläulichgrüne, keine gelblichgrünen. Alles dies spricht mehr für Zunahme und Neubildung der Chromophane im belichteten Vogelauge, als für deren Zerstörung durch Licht und es könnte darnach höchstens einen gelben Farbstoff in den Zapfen geben, der dem Lichte langsam wiche.

3. *Verhalten des Epithels.*

a. Das Lipochrin. Die goldgelben Oelkugeln des Retinaepithels unterliegen bei lebend geblendeten Fröschen nachweisbaren Veränderungen: sie werden, wie Boll andeutete, blasser und auch farblos. Hier lag anfänglich Verwechselung mit den Myeloïdkörnern, die erst später gefunden wurden, vor, aber es ist gleichwohl zweifellos, dass die Oelkugeln sich wirklich verändern; ihre Farbe wird heller, blass citrongelb, verschwindet selbst und es treten höchst merkwürdige Theilungen an ihnen auf, die vermuthen lassen, dass sie sich durch Aufnahme anderer Stoffe aus dem Zellenleibe zuvor in Gebilde verwickelterer Structur und Mischung umwandeln. Grössere Oelkugeln finden sich nach Blendungen umgeben von Häufchen kleinerer und einzelne Zellen enthalten nur diese letzteren. Je kleiner die Kugeln geworden, desto weniger ist daran meist, trotz der Schichtung zu Haufen, von Färbung zu sehen. Von den Myeloïdkugeln sind die

entfärbten Oelkugeln natürlich ausdrücklich erst durch das Verhalten zu Alkohol-Aether, Galle und Osmiumsäure (vergl. S. 246) zu unterscheiden. Aus noch mitzutheilenden Gründen zeigen sich die Oelkugeln nach maximaler Blendung, bei künstlich erweiterter Pupille, nicht an der am stärksten belichteten Stelle, sondern in deren Umkreise am meisten erblasst.

b. An den Myeloïdkörnern ist eine Lichtwirkung wohl wahrscheinlich, aber nicht erwiesen. Sie können fehlen, und in grosser, wie in kleiner Menge in Dunkel- wie in Hellaugen angetroffen werden. Am wahrscheinlichsten ist es, dass ihr Auftreten und Schwinden im Zusammenhange stehe mit Processen, die auf die Lichtwirkung im Dunkeln folgen, oder während continuirlicher, mässiger Belichtung stattfinden.

c. Das Fuscin scheint im Leben durch intensivste Blendung oder durch lang dauernde, gute Belichtung zu bleichen. Es gilt dies zwar nicht für die zwischen den Stäbchen und Zapfen vorgedrungenen, niemals Spuren von Verfärbung zeigenden Pigmentnadeln, welche besonders in der Froschretina wegen der Brechung des Lichtes an den Paraboloïden der Innenglieder zur Stäbchenaxe am wenigsten Licht erhalten, sondern nur von solchen Nadeln, welche im Zellenleibe hinter den Enden der durchleuchteten Stäbchencylinder liegen. Sichere Entscheidung giebt es darüber bis jetzt nicht: man findet in den geblendeten Augen nur einen eigenthümlich streifigen oder struppigen Inhalt im Protoplasma der Zellenkuppen, der für ausgebleichtes Fuscin zu nehmen ist.

Anhang. Veränderung der entfärbten Stäbchencylinder. An der Sonne im Leben gebleichte Stäbchenaussenglieder des Frosches zeigen ihre optischen Querschnitte beim Betrachten der Rückfläche so dicht gestellt, wie eng auf die Schnur gezogene Perlen, während sie in mässig belichteten oder ungebleichten Netzhäuten durch erhebliche Zwischenräume getrennt bleiben. Schwellung der Cylinder durch Licht, oder durch die Belichtung begleitende Processe wird hiernach wahrscheinlich. Nach einigen von v. Hornbostel[1] ausgeführten Messungen schwankt der Stäbchendurchmesser bei Dunkelfröschen von 0,006—0,007 mm, der der Zwischenräume von 0,0005—0,0008 mm, abgesehen von den grösseren, nach vorn von den Zapfen ausgefüllten Spalten. Stäbchen und Zwischenräume nehmen somit den Platz von 0,0065—0,0078 mm Durchmesser in Anspruch. Nach $^3/_4$—1 stündiger Besonnung sind die Stäbchen bis zur gegenseitigen Berührung angeschwollen und sind dann 0,0068—0,0072 mm dick. Ueber 0,008 mm steigt der Durchmesser auch nach 7—9 stündiger Besonnung nicht, und selten erreichte die Quellung den Grad, dass gegenseitige Abplattung erfolgte. Nach 1—1$^1/_2$ stündi-

[1] v. Hornbostel, Unters. aus dem physiol. Instit. z. Heidelberg I. S. 409.

gem Dunkelaufenthalte nehmen die Cylinder den genannten kleineren Durchmesser wieder an. Im rothen Lichte wird die Schwellung nicht bemerkbar, bevor nicht der Purpur gänzlich verschwunden ist.

II. Regenerative Vorgänge.

Alle beim Sehen gebleichten Stäbchen sind des Purpurs nur vorübergehend beraubt; sie nehmen nach genügendem Dunkelaufenthalte wieder maximale Färbung an. Im lebenden Auge giebt es also regenerative, den Sehpurpur wiederherstellende Vorgänge, die nach Art gewisser, allen Organismen zukommenden Processe dem Verbrauche durch Ersatz begegnen. Müssen wir solche Processe auch den niedersten und einzelnen Elementarorganismen zuschreiben, so herrscht doch im Allgemeinen die Neigung sehr verschiedene und namentlich gegensätzliche Processe, deren die vorliegenden ein eclatantes Beispiel bilden, um so mehr auf einzelne Organe, Gewebe, Säfte oder Elementarorganismen vertheilt zu denken, je höher entwickelt ein Organismus, und je grösser die Arbeitstheilung in ihm ist, und vor Allem ist man der Meinung, den Abgang des Verbrauchten sammt dem Ersatze desselben den bewegten Säften des Blutes oder der Lymphe zuschreiben zu müssen, wo die Organe von einem Gefässsysteme drainirt und gespeist werden. Die Retina liefert ein neues Beispiel dafür, wie übertrieben unsere Vorstellungen von der Erhaltung der den Geweben eigenthümlichen Vorgänge durch den sog. Ernährungsstrom im Allgemeinen sind und vermehrt die Gründe uns der Gewebe so vieler Geschöpfe zu erinnern, welche von jenen bewegten Vorräthen getrennt, nicht nur fortfahren selbständig bei der ihnen eigenthümlichen Leistung zu verharren, sondern sich auch nach erschöpfender Anstrengung durch blosses Wegfallen der äusseren Anregung wieder zu erholen. Wie der isolirte Muskel und Nerv niederer Wirbelthiere und vieler Wirbellosen während geraumer Zeit aus sich selbst alles zu neuer Leistung Nöthige schöpfen, so geht es auch der Netzhaut, auf welche der Ernährungsstrom ebenfalls nur ganz indirecten Einfluss übt.

Man setze einen Frosch 1/2 Stunde an die Sonne, exstirpire beide Bulbi und überzeuge sich an dem einen von der vollständigen Entfärbung der Netzhaut; nach 1—2 Stunden betrachte man die des andern, der inzwischen im Dunkeln feucht gehalten worden: man wird sie intensiv purpurn und sowohl ihre grünen, wie die übrigen Stäbchen so vollkommen gefärbt finden, wie an jedem normalen, frisch aus dem Kopfe genommenen Dunkelauge. Ein zum Vergleiche genommener, mitbesonnter Frosch, der den späteren Dunkelaufenthalt lebend

theilte, liefert keine besser gefärbte Netzhaut, und wenn man viele Versuche dieser Art anstellt, findet man von den ersten 20 Minuten der Lichtentziehung an bis zu der nach 1 — 2 Stunden vollendeten Rückfärbung, gar keine wesentlichen Unterschiede zwischen den im Leben und im Ueberleben regenerirten Stäbchen. In beiden beginnt die Färbung mit blassem Lila, und geht durch Rosa zum alten Bestande zurück. Der exstirpirte Bulbus kann selbst halbirt und der Glaskörper entleert sein, ohne der Regeneration ganz beraubt zu werden.

Das regenerirende Epithel.

Welches Gewebe zur Regeneration erforderlich sei, entscheidet das Folgende. Man nehme die von der Sonne im Leben gebleichte Netzhaut aus dem Auge eines im Curareödem befindlichen Frosches epithellos heraus und bewahre sie 2 Stunden im Dunkeln in der feuchten Kammer; daneben lege man die mit dem gesammten Epithel ausgeschlüpfte Netzhaut eines ebensolange besonnten, nicht curarisirten Frosches. Die epithelfreie Netzhaut wird jetzt ungefärbt gefunden, die andere, durch das Pigmentepithel mikroskopisch, oder nach dem Abschaben des letzteren angesehen, farbig, zwar nicht so intensiv, wie gewöhnlich, aber doch gut rosenfarben und hinsichtlich der grünen Stäbchen, wie normal. Im Leben gebleichte Stäbchen regeneriren ihren Purpur also nicht aus sich selbst oder aus Geweben die vor ihnen liegen, sondern aus dem dahinter liegenden Epithellager: das Retinaepithel besitzt für den Sehpurpur regenerirende Function, es wirkt regenerirend auf die Stäbchen.

In der vom retinalen Epithel ausgehenden Wiedererzeugung des Purpurs liegt der Grund für die Unterschiede der Bleichungszeit lebender oder im Zusammenhange mit dem Epithel überlebender und isolirter oder im Bulbus abgestorbener Netzhäute, d. h. die Ursache der anscheinenden Indolenz des Sehpurpurs im Leben. Diese Unterschiede sind beim Frosche erstaunlich gross, bei den Säugern sehr gering. Während die Froschnetzhaut isolirt am directen Sonnenlichte in unmessbar kurzer Zeit ausbleicht, bedarf sie im Auge des lebenden Frosches dazu mindestens 10 Minuten, und noch etwa 3 Minuten, wenn Cornea und Linse entfernt sind und die Sonne durch das grosse Loch darauf scheint, das sich an Stelle der engen Pupille durch einen Sperrhalter in der Iris herstellen lässt. Ein im diffusen Tageslichte lange geöffnet gelegener Bulbus liefert häufig noch recht intensiv gefärbte Netzhautpräparate, nachdem die des andern Auges, während umständlicher, mikroskopischer Untersuchungen schon ganz von demsel-

ben Lichte entfärbt worden; kurz auch im offenen und der Circulation beraubten Auge ist die Retinafarbe verhältnissmässig echt gegen Licht. Werden 2 mikroskopische Präparate von den Netzhäuten zweier Dunkelfrösche angefertigt, das eine ohne, das andere mit dem Epithel, wozu es besondere, später mitzutheilende Methoden giebt, und beide nur von vorn, mit Hülfe des von unten kommenden Lichtes der Spiegel am Mikroskope, welche es derselben Lichtquelle entnehmen, beleuchtet, so sieht man das epithelhaltige Präparat 3—4mal später bleichen, als das epithelfreie. Haftet das Epithel nur stellenweise, so macht sich der gleiche Unterschied an einer und derselben Netzhaut geltend, der in beiden Fällen nicht auf Hindernisse der Beleuchtung durch das Fuscin zurückzuführen ist, da das Licht von vorn kommt, und durch die der Beobachtung zugänglichen Stäbchen kaum gehindert hindurchgeht.

Wird das Epithel stellenweise von der Stäbchenschicht gelockert, indem man einen halbirten Bulbus so zerrt und drückt, dass sich die Netzhaut in Falten legt, darauf das Präparat dem Tageslichte ausgesetzt, bis die Falten gebleicht sind, und die Membran in ganzer Ausdehnung abgezogen, so erscheinen die vorherigen Falten als blasse oder farblose Streifen in rothem, oft sogar noch purpurfarbenem, nach längerem Belichten auf chamois oder gelbem Grunde. Die Netzhaut kann auch zur Hälfte aus dem Bulbus emporgehoben und bis zur Bleichung dieses Antheiles belichtet werden; darauf herausgezogen, zeigt sie eine rothe oder gelbe und eine farblose Hälfte.

Die Bleichung des Purpurs durch Licht wurde als ein rein physikalisch-chemischer, von allen Lebensbedingungen, Structurverhältnissen und histochemischen Anordnungen, die wir der lebenden Retina zuzuschreiben haben, unabhängiger Process erkannt und beschrieben; da derselbe aber in der isolirten und epithelfreien Netzhaut unvergleichlich schneller verläuft, blieb noch zu erweisen, dass er nicht durch einen cadaverösen Vorgang beschleunigt werde. Denn wenn auch Zerquetschen, Alaunisiren, Gefrieren und Wiederthauen, Lösen der Netzhaut durch Galle u. s. w. die Bleichungszeit, im Vergleiche zu der einer herausgenommenen frischen Retina, nicht erheblich abkürzen, so konnte dies daran liegen, dass der e r s t e cadaveröse Process, auf den es ankam, in der einmal isolirten Netzhaut bereits abgelaufen war. In gewissem Sinne trifft dies zu, insofern das Ablösen der Stäbchen vom Epithel zwei aufeinander angewiesene Gewebe trennt, nicht aber insofern darnach das Wesen des vom Lichte am Rhodopsin hervorgerufenen Processes geändert würde. Die Purpurbleiche durch Licht im Leben ist deshalb für vollkommen identisch

mit der an einer Purpurlösung erfolgenden zu halten, weil die Epithelfunction die vorkommenden zeitlichen Differenzen zwischen der letzteren und der Netzhautbleichung genügend erklärt.

Nicht so steht es um die Wiederfärbung im Leben gebleichter Netzhäute, auf welcher zugleich die scheinbare Indolenz des Rhodopsins intra vitam beruht, denn wenn das Epithel zwar vorhanden und selbst in unlösbarer Weise mit der Stäbchenschicht verbunden ist, so muss es ausserdem im Vollbesitze seiner Lebenseigenschaften sein, um jene Indolenz zu bewirken, vollends um einmal gebleichte Stäbchen wieder zu färben. Man lege ein Froschauge in Salzwasser von 45° C. bis es ganz durchwärmt ist und halte es, wieder abgekühlt, mit der opak gewordenen Netzhaut gegen Tageslicht: jetzt wird man die Färbung ebenso rasch schwinden sehen, wie an jeder epithelfreien frischen Netzhaut. Ein bei Lebzeiten in der Sonne um seinen Purpur gebrachter Frosch, im Dunkeln sogleich in ein Bad von 45° C. geworfen, das ihn bis in seine Elementarorganismen abtödtet, zeigt nach längerem Liegen im Dunkeln keine wieder gefärbte Netzhaut.

Da es im gesammten Wirbelthierleibe wenig eigenthümlichere und anscheinend unnachahmlichere Verbindungen verschiedenartiger Elementarorganismen giebt, als die der von je einer epithelialen Pigmentzelle umfassten Stäbchen-Zapfengruppe, sollte man meinen, dass die functionellen Wechselbeziehungen zwischen ihnen erlöschen müssten, wenn jene Anordnung einmal getrennt worden. Dem ist nicht so. So lange die nach dem Abziehen der Sehzellen blossgelegte Vorderfläche des Epithellagers nur einigermaassen frisch erhalten wird, bleibt sie vollkommen fähig, unter gewissen Umständen gebleichte Stäbchen, wieder zu färben. Man hebe die Netzhaut nur mit einem Lappen vom Epithelgrunde ab, stütze diesen mit einem Porzellanscherben gegen das Licht, bis man sich von seiner Bleichung überzeugt hat, lasse ihn wieder gegen das Epithel zurücksinken und halte das Auge jetzt 10—30 Minuten im Dunkeln. Zieht man darauf die ganze Retina heraus, so wird sie ganz homogen purpurn gefunden und so gleichmässig gefärbt, dass nicht einmal die Grenze anzugeben ist, bis zu welcher sie zuvor gebleicht worden. Es kann auch aus einem möglichst nahe der Iris, durch einen Kreisschnitt geöffneten Bulbus, die ganze Retina an der Zonula Zinnii hängend, vom Glaskörper gefüllt, an der Linse gepackt, wie ein Beutel hervorgezogen, ans Licht getragen, gebleicht und wieder an den alten Platz ins Auge zurückgelegt werden, ohne dass der Epithelgrund aufhörte sie wieder zu färben. Hiernach ist es ausser Zweifel, dass die aufgerissene Epithelplatte nicht unbe-

trächtliche Zeit überlebt und die Fähigkeit bewahrt, gebleichte Stäbchen, bei vollkommen unnatürlicher Berührungsweise, wieder zu färben. Was solches Epithel aber nicht vermag, das ist die Wiederfärbung im Leben gebleichter Stäbchen; diese Versuche glücken also nur mit Netzhäuten, welche nach der Isolation belichtet worden.

Da das Epithelium das Regenerationsvermögen durch Absterben verliert, ist bei den Säugern, deren Gewebe nach erloschener Athmung und Circulation schnell absterben, kaum auf die Möglichkeit zu rechnen, die charakteristische Epithelfunction nachzuweisen. In der That zeigt die dem lebenswarmen Kaninchenauge schnell entnommene Netzhaut, am Lichte gebleicht und gegen ihren Epithelgrund zurückgelegt keine Rückfärbung, es giebt aber Mittel wenigstens den Einfluss des Absterbens auf die Bleichungszeit und den der kurzen Ueberlebenszeit des retinalen Epithels auf jene zu erkennen. Man stellt zu dem Ende im Auge eines lebenden Kaninchens ein Optogramm her, notirt die Expositionszeit, köpft das Thier sofort und exponirt das andere Auge ebenso lange unmittelbar darauf. Bei sorgfältiger Beachtung der S. 302 erwähnten Zeichen an den Optogrammen, welche den Grad der Lichtwirkung scharf beurtheilen lassen, stellt sich eine unzweifelhaft stärkere Bleichung an dem letzteren heraus, die noch deutlicher wird, wenn das Todesoptogramm nicht so eilig, erst 2—3 Minuten nach dem Decapitiren angefertigt worden. Solche Versuche haben freilich nur bei ziemlich intensivem Lichte Erfolg, weil die Expositionszeiten kurz genug sein müssen, um die Ueberlebenszeit nicht zu überdauern und weil die Pupille in einem bestimmten Stadium nach dem Tode, trotz Anwendung von Atropin sehr eng wird. Der Versuch ist daher nur ganz beweisend, wenn die Augen vor und nach dem Tode mit einem engen Diaphragma versehen werden, über dessen Dimensionen hinaus die Pupille sich nicht verengern kann. An in den letzten Lebensmomenten entstandenen Optogrammen Zeichen postmortaler Regeneration zu entdecken, gelingt nicht, ebensowenig der Nachweis, dass ein sogleich nach dem Tode hergestelltes Optogramm durch weiteres Liegenbleiben im Auge rückgängige Veränderungen erfahre.

Einfacher, obschon minder scharf überzeugt man sich von der Regeneration im absterbenden Säugerauge durch directe Beobachtung bleichender Netzhäute an albinotischen Kaninchen. Indem man den frischen, pigmentlosen Augengrund dieser Thiere mit der Sclera über eine entsprechend convexe Fläche umklappt, erkennt man die von der streifig-rothen Blutzeichnung unterschiedene, diffuse Purpurfarbe der Stäbchen leicht. Wird ein Stück dieser Netzhaut sofort vom Epi-

thel abgezogen und auf einem weissen Teller belichtet, so erscheint dieses vollkommen farblos zu einer Zeit, wo der auf dem Augengrunde gebliebene Antheil noch kaum verändert, oder rasch ebenfalls abgezogen, mindestens noch deutlich gelb aussieht. An Augen, welche etwa 10 Minuten nach dem Tode im Dunkeln gelegen, ist dieser Unterschied nicht mehr vorhanden: die Gegenwart des Epithels und zwar nur des frischen, überlebenden, verzögert also auch beim Kaninchen die Bleichung etwas.

Regeneration im sehenden Auge.

In jeder Beziehung unerwartet verläuft die Regeneration des Sehpurpurs im Leben ausserordentlich langsam. Beim Frosche, wo man im Allgemeinen trägere stoffliche Vorgänge gewöhnt ist, mag dies weniger überraschen, aber Kaninchen und Hund sind ihm in diesem Falle nicht besonders überlegen. Wie schon angeführt, braucht der Frosch 20 Minuten Dunkelheit um die erste Spur der Stäbchenfärbung wieder zu gewinnen, 1—2 Stunden, zuweilen noch mehr um sie auf die Höhe zu bringen. Die grossen Differenzen hängen ab von der Temperatur: bei hoher Temperatur dürfte 1 Stunde die kürzeste Frist sein, worin sich der Vorgang vollendet; setzt man die Thiere nach der Bleichung in Eiswasser, so bedürfen sie dazu der colossalen Zeit von 9 Stunden. Von den Kaninchen bemerkte Coccius [1] zuerst, dass sie nach längerem Aufenthalte im Freien und darauf folgendem Verweilen im Dunkeln, nach der nächsten halben Stunde noch sehr blasse Netzhäute hatten. Sicher des Purpurs beraubte Kaninchen [2], die mit atropinisirten Augen im Freien an der Sonne gesessen, brauchen 7 Minuten Dunkelheit um den ersten schwach rosafarbenen Anflug, 33—38 Minuten um maximal gefärbte Stäbchen zu erhalten.

Sehr scharf wird über den Gang der Regeneration durch die optographische Methode entschieden. Um die Zeit der vollkommenen Wiederherstellung des Purpurs zu bestimmen, wird zunächst auf einem Auge ein Optogramm erzeugt, dessen Vollkommenheit zu constatiren ist, indem man den Bulbus gleich nach beendeter Exposition enucleïrt. Unmittelbar darauf, so dass die Lichtintensität inzwischen meist keine Aenderung erlitten haben kann, wird das zweite Auge ebenso lange exponirt und beispielsweise 40 Minuten später geöffnet und alaunisirt. Ist keine Spur des Optogramms mehr sichtbar, so beweist dies vollkommene Wiederherstellung des Purpurs, soweit unser

1 Coccius a. a. O.
2 A. Ewald und W. Kühne a. a. O.

Auge über Farbendifferenzen zu entscheiden vermag. Die genannten Zeiten wurden auf solche Weise gefunden.

Wie die Sehleiste und die subhorizontale Netzhautfläche wegen ihres verschiedenen Purpurgehaltes die genaueste Beurtheilung der Lichtwirkung gestatten, wo sich die letztere optographisch über beide Theile erstreckt, so dienen diese im Auge vieler Thiere vorhandenen Netzhautbildungen auch vortrefflich um den Gang der Regeneration zu erschliessen. Die Rückfärbung kann vollkommen sein auf der Fläche und noch unvollendet auf der Leiste, unvollkommen auf der ersteren und auf der letzteren noch so im Rückstande, dass hier statt verwaschener Bildspuren messbare Reste vorliegen.

1) Die Rhodogenese.

Neogenese und Anagenese. Genau bis zur Farblosigkeit oder länger exponirte Netzhäute enthalten in keinem Stadium der Regeneration Sehgelb: ihre Farbe beginnt mit dem blassesten Lila oder Rosa und geht nur durch Stufen steigender Sättigung des Rosenroth zum Purpur zurück; selbst Chamois wird unter diesen Uebergangsfarben vermisst. Der Sehpurpur kann hier also nicht in derselben Weise rückwärts aus Sehweiss entstehen, wie dieses aus jenem hervorgegangen und der Process beginnt demnach gewiss nicht von in den Stäbchen abgelagertem Sehweiss aus, unter Verwendung von Material, das schon einmal zum Umsatze des Lichtes gedient hatte, sondern fängt mit etwas Neuem, neogenetisch an. Es ist kaum zu bezweifeln, dass der Vorgang in einer Abgabe entweder fertigen Sehpurpurs, oder frischen Materials, aus welchem sich jener sogleich bildet, an die Stäbchen besteht. Im ersteren Falle würde die Epithelzelle zur Bildungsstätte fertigen Sehpurpurs, der in dem Maasse darin entsteht, als die Stäbchen seiner bedürfen, oder in dem Maasse an diese abgegeben wird, als er in dem Epithelprotoplasma fertig geworden. Dieser, wie immer beschaffene, als Neogenese zu bezeichnende Vorgang ist es, welcher mit der hervorgehobenen auffallenden Langsamkeit verläuft.

Ausser der Neogenese existirt ein zweiter Vorgang, mehr gegenseitiger Art zwischen Stäbchen und Epithelzellen: es ist die Anagenese, ein Process der nicht ausschliesslich in der Lieferung vorher gefertigten und neuen Färbungsmaterials an die Stäbchen, sondern in einer Herstellung des alten, schon einmal gebrauchten, in den Stäbchen liegen gebliebenen, besteht, dessen Reste in Gestalt von Sehweiss noch keine Gelegenheit fanden die Stäbchen zu verlassen. Diese Anagenese ist gekennzeichnet durch die Farbenfolge: sie be-

ginnt niemals mit Lila oder Rosa, sondern immer mit Gelb, von welchem sie durch Chamois, Orange und Roth zum Purpur zurückführt, also in der umgekehrten Reihenfolge, in welcher der Sehpurpur am gemeinen Lichte zur Farblosigkeit übergeht. Um diesen Process allein scheint es sich zu handeln, wenn eine isolirt gebleichte Netzhaut in den Epithelgrund des Froschauges zurückgelegt, wieder gefärbt wird, wobei sie durch die erwähnte Farbenreihe vom blassesten Strohgelb, in verhältnissmässig kurzer Zeit zum Purpur zurück gelangt. Aehnlich, obschon nicht so rein, weil die Neogenese sich einmischt, verläuft der Process im lebenden Auge, wenn dessen Stäbchen, nach unvollkommener Bleichung, der Restitution theilhaftig werden, was wiederum und auch im Kaninchenauge durch die mit Gelb nuancirte Farbenreihe charakterisirt ist. Ein von unvollendeter Regeneration noch kenntlich gelassenes Optogramm muss also in den hellen Streifen Sehgelb enthaltende Farben aufweisen, wenn es unterexponirt entstanden war, d. h. in allen Fällen, wo jene Streifen zu schmal sind; und so ist es in der That, während die zu breiten hellen Streifen überexponirter Optogramme, in allen Stadien der regenerativen Auslöschung jene Farben niemals enthalten dürfen, was ebenfalls vollkommen zutrifft, da daran niemals andere Farben als die eines mehr oder minder gesättigten Purpurs zu sehen sind. Der Streifenbreite nach richtig exponirte Bilder können endlich theils neogenetische, theils anagenetische Zeichen besitzen, wie es auch thatsächlich beobachtet wird.

Da die Regeneration durch Anlegen der Froschnetzhaut gegen das Epithel des exstirpirten Bulbus in 10—30 Minuten verläuft, also mit der Neogenese verglichen, überraschend schnell, kann für das lebende Auge gleichfalls ein viel rascherer Wiedergewinn des Purpurs vorausgesetzt werden, wo derselbe nicht ganz aus den Stäbchen geschwunden und die Möglichkeit der Anagenese zuzugeben ist. Nur angebleichte Netzhäute, oder in allen Theilen noch farbige, aber immerhin schon recht deutliche Optogramme bedürfen wirklich beim Kaninchen nur 10—15 Minuten Lichtentziehung, um vollständig zu verschwinden. Dies erklärt zugleich ein besonderes Verhalten fast aller unvollkommen regenerirten Optogramme, dessen darum erst hier Erwähnung geschieht, nämlich dass selbst überexponirte Bilder während der Regeneration zu klein, um die peripheren Theile verkürzt oder in diesen gelb nuancirt gefunden werden. Da die auf die Netzhautperipherie gefallenen Antheile des Bildes die schwächer belichteten sind, so können sie unterexponirt bleiben, wenn die centralen schon überexponirt sind.

Für das Sehen der Thiere und Menschen verdient die verhältnissmässige Geschwindigkeit der Anagenese Beachtung, weil dieser Vorgang es ist, welcher bei dem bevorzugten Lichte geschlossener Räume, das unsere Netzhaut sonst sicherlich bald ganz entfärben würde, mehr in Betracht kommt, als die Neogenese und weil derselbe unseren Stäbchen am meisten helfen wird, bei dem langsamen Wechsel mittleren und gedämpften Lichtes, den wir gern aufsuchen. In gewissen Intervallen wechselndes Licht verliert bei Kaninchen alle optographische Wirkung. Unter Umständen, wo ein gutes, obschon nicht vollendetes Bild im atropinisirten Auge bei 45 Sec. constanter Belichtung, entstand, lieferte dieselbe Belichtungszeit im Ganzen, wenn sie je $^1/_4$ Sec. nach $^3/_4$ Sec. Beschattung anhielt, was mit regelmässig rotirenden Diaphragmen leicht zu bewerkstelligen war, gar keine Anbleichung, und nur Spuren eines sehr kleinen auf das Centrum der Retina beschränkten Optogramms, nachdem die Belichtung im Ganzen $7^1/_2$ Min. betragen, und das Licht während einer vollen Stunde, nach je $^7/_8$ Sec. Dunkelheit, $^1/_8$ Sec. gewirkt hatte.

Zur künstlichen Regeneration des Stäbchenpurpurs ist zwar Wiederberührung mit überlebendem Epithel erforderlich, die Netzhaut selbst kann aber bereits abgestorben sein. Dieser Umstand wird ebenso, wie der schon erwähnte, dass nur isolirt gebleichte Netzhäute der künstlichen Regeneration fähig, im Leben gebleichte dazu ungeeignet sind, durch das Folgende verständlich.

2) Die Autoregeneration.

Aus Dunkelaugen vollkommen fuscinfrei entnommene Froschnetzhäute, feucht gegen eine verticale Fläche geklebt, zeigen schwachem Lichte exponirt häufig merkwürdige Verspätung der Ausbleichung im unteren, herabhängenden Rande und wenn man eine Reihe solcher Retinae, sich berührend übereinander klebt, so können die oberen schon farblos sein, während die unteren kaum verändert sind. Dies macht den Eindruck, als ob etwas regenerirend Wirkendes aus den oberen zu den unteren flösse, vielleicht Reste fuscinfreien Epithelprotoplasmas, das aus den Stäbchenzwischenräumen nicht ganz zu entfernen sein mag.

Jede isolirt gebleichte Froschnetzhaut zeigt ferner nach 2—3-stündigem Verweilen im Dunkeln eine gewisse Wiederkehr der Farbe: sie wird blassstrohgelb, dann hellchamois endlich blassrosa und wenn man dies am folgenden Tage etwa wieder fortbleicht, so kehren die Farben schwächer und langsamer zum zweiten Male zurück, zuweilen, nach abermaligem Belichten, selbst zum dritten Male. Die

Membran wird dabei in der Regel teigig und trübe, ohne dass diese unzweifelhaften Zeichen des Absterbens den geringsten Einfluss auf die Autoregeneration übten. Hat man die Netzhaut im Dunkeln, in etwa 24 Stunden absterben und dann erst ausbleichen lassen, so wirkt die erste Lichtentziehung ebenso kräftig und schnell, wie auf die frische Membran. Die Netzhaut kann auch 24 Stunden im Dunkeln, in gesättigter NaCl-Lösung gelegen haben, darauf mit NaCl von $^1/_2$ pCt. ausgewaschen und nach dem Abtropfen durch Licht gebleicht sein, ohne das Vermögen zur Rückfärbung zu verlieren. Die Erscheinung ist dann sogar noch deutlicher, als an nicht gesalzenen Präparaten. Wird die gesättigte Salzlösung nicht entfernt und die Bleichung in derselben vorgenommen, was an der Sonne mehr als 1 Stunde erfordert, so kehrt die Farbe im Dunkeln ebenfalls zurück, aber erst in 5—8 Stunden und nur bis zum Chamois gehend. Aehnlich verhält sich eine mit Glycerin befeuchtete Netzhaut, während nach der Behandlung mit NH_3 oder Soda keine Wiederkehr von Farbe zu bemerken ist.

Im Leben gebleichte und epithelfrei aus dem Auge gekommene Netzhäute zeigen unter den genannten Behandlungen keine Spur von Autoregeneration.

Ohne gegenwärtig entscheiden zu können, ob die Autoregeneration von Substanzen herrühre, welche in den Stäbchen stecken, oder von pigmentlosen Epithelfragmenten, welche diesen anhaften, sind die vorliegenden Thatsachen als wichtige Belege für einen von allen Lebenseigenschaften der fraglichen Gewebe unabhängigen, chemischen Process zu halten, welcher die Nachahmung eines der merkwürdigsten Lebensvorgänge enthält. Für denselben wurde eine hypothetische Erklärung versucht, nach welcher die Stäbchen der isolirt belichteten Netzhaut mit den Bleichungsproducten des Purpurs, nämlich mit dem Sehweiss behaftet blieben, welches unter Einwirkung einer andern, vorläufig als R h o d o p h y l i n zu bezeichnenden Substanz, die aus dem Epithel stammt und in kleinen Mengen an oder in den Stäbchen haftet, im Dunkeln wieder zu Sehgelb und Sehpurpur werde. Die Hypothese erklärt die Unfähigkeit im Leben gebleichter Netzhäute zur Autoregeneration aus dem gleichen Grunde, aus welchem denselben auch statt anagenetischer, nur neogenetische Restitution der Färbung zukommt, wenn das Sehweiss im Leben irgendwie verloren geht.

Auf Schwinden des Sehweiss durch Resorption oder durch andere Vorgänge darf geschlossen werden, weil den im sehenden Auge entfärbten Netzhäuten eine wichtige, in kaum zu bezweifelndem Zusammenhange mit den letzten Bleichungsproducten des Purpurs stehende Reaction abgeht, nämlich die kräftige weissgrüne Fluorescenz; es

bleibt also wesentlich der Nachweis zu führen übrig, dass eine oder mehrere Substanzen von rhodophylactischen Eigenschaften, oder Etwas, unabhängig von allen sonstigen Lebensvorgängen, auf Sehweiss anagenetisch wirkendes in der Retina und vorzugsweise in deren Epithel vorkomme.

3) Künstliche Rhodogenese.[1]

Kann die Autoregeneration abgetödteter Retinae im Gegensatze zur vitalen Rhodogenese schon als eine künstliche bezeichnet werden, so hat dieselbe Erscheinung an gebleichter Purpurlösung darauf noch grösseren Anspruch. Aus Froschnetzhäuten mit 2 procentiger, vollkommen alkohol- und ätherfreier Galle bereitete Purpurlösungen zeigen nach vollständigem Ausbleichen zwar schwache, aber unverkennbare Rückkehr der Färbung nach einigem Stehen im Dunkeln: sie pflegen nach 40 Minuten hellgelb, in 1—2 Stunden sehr blassrosa zu werden und es kann sich dies ein- bis zweimal, nach erneuter Belichtung langsamer und mit abnehmender Deutlichkeit wiederholen. Die gewöhnliche Purpurcholatlösung enthält also alles zur Anagenese Erforderliche: nach der Hypothese neben überschüssigem Sehweiss, Spuren von Rhodophylin. — Lösungen im Leben gebleichter und mittelst des Curareödems vom Epithel getrennter Netzhäute färben sich im Dunkeln gar nicht.

Seit es so viele Gründe giebt, dem retinalen Epithel den mächtigsten Einfluss bei der Anagenese, wie bei der Neogenese zuzuschreiben, war zu erwarten, dass die so leicht ebenfalls mit Galle herstellbaren Lösungen des Epithelprotoplasmas, gebleichten Stäbchenlösungen zugesetzt, mächtig rückfärbend auf die letzteren wirken würden. Ein solcher Versuch ist bis jetzt an der Schwierigkeit gescheitert reine hämoglobinfreie Epithellösungen zu gewinnen, da das im Augengrunde mit der Chorioïdes zurückbleibende Epithellager von der blutreichen Unterlage nicht zu trennen war. Für die vorliegenden Zwecke gesellt sich dazu ein Uebelstand, der in der Unmöglichkeit besteht, solche schon mit Hämoglobin verunreinigte Epithellösungen auch frei von Sehpurpur zu erhalten. Das im Dunkelauge von selbst zurückbleibende, im Hellauge durch Oedem, beim Ausschlüpfen der Netzhaut an die Uvea zu fesselnde Epithel liefert nach Verarbeitung der Augengründe mit Galle immer schwarze Flüssigkeiten, die nach dem Absetzen des Fuscins neben der bleibenden Blutfärbung Veränderun-

[1] A. Ewald und W. Kühne, Centralbl. f. d. med. Wiss. 1877. S. 753 und a. a. O. I. S. 248.

gen am Lichte erkennen lassen. An der Sonne blassen sie deutlich bis auf die spectroskopisch nachweisbare, dünne, oft venös grünliche Blutfarbe ab; darauf ins Dunkle zurückgebracht zeigen sie schon nach 15 Min. Vertiefung der Farbe, nach einigen Stunden Uebergang ins Kirschfarbene, Erscheinungen, welche sich nach neuen Belichtungen wiederholen. Wie unvortheilhaft und unerwartet dieses Verhalten sein mag, so bürgt es für eine sehr wichtige Eigenschaft der Epithelzellen, nämlich für die, Sehpurpur in sich, ohne Zuthun der Stäbchen bilden zu können, was für die Neogenese besondere Beachtung verdient.

Um die ebengenannten Schwierigkeiten zu umgehen, ist die Rückfärbung reiner Stäbchenlösungen mit derjenigen von Lösungen aus Epithel und Stäbchen zu vergleichen. Letztere sind leicht hämoglobinfrei darzustellen, indem man die Netzhaut in Eis gehaltener Dunkelfrösche mit der gesammten, jetzt haften bleibenden Epitheldecke aus dem Auge zieht und wie gewöhnlich mit Galle behandelt; durch Absetzen und Abpipettiren vom Fuscin befreit erscheinen sie rein purpurfarben. Vergleichung der beiden, mit gleichen Cholatlösungen, aus gleich vielen Netzhäuten hergestellten Flüssigkeiten ergiebt: 1. viel langsamere Bleichung der epithelhaltigen am gleichen Lichte, 2. viel schnellere und intensivere Rückkehr der Farben nach Lichtentziehung in dieser, als in der reinen Stäbchenlösung. Hiermit ist der Beweis besonderer rhodophylactischer Wirkung in Galle löslicher Epithelstoffe, oder der Anwesenheit einer als Rhodophylin zu bezeichnenden Substanz gegeben.

Für das sehende Auge darf nach den hier erörterten Erfahrungen bezüglich des Vergehens und Entstehens der Stäbchenfärbung Folgendes angenommen werden: das Licht zersetzt den Sehpurpur allmählich, so dass Mischungen, 1. von Purpur und Sehgelb, 2. von Purpur, Gelb und Sehweiss, 3. von Gelb und Sehweiss, endlich nur Sehweiss in den Stäbchen übrig bleiben. In Folge einer fortwährend bestehenden anagenetischen Rhodophylaxe werden die genannten photochemischen Zersetzungsproducte in der umgekehrten Reihefolge ihrer Entstehung zurückverwandelt, so lange das Licht schwach ist und die photochemische Zersetzung mit der Rhodophylaxe im Gleichgewichte ist. Ist das Gleichgewicht zu Gunsten der Lichtwirkung gestört, so beginnt die Bleichung überhaupt erst merklich zu werden; dieselbe ist aber mit derjenigen isolirter Netzhäute verglichen, bis zu beträchtlichen Intensitäten der Beleuchtung hin, stark verlangsamt (scheinbare Indolenz des Purpurs sehender Augen). In dem Maasse, wie bei steigendem Lichte Sehweiss gebildet und nicht mehr zu Sehgelb und

Sehpurpur zurückverwandelt werden kann, entweicht das letzte Bleichproduct aus den Stäbchencylindern, vielleicht indem es die Retina gänzlich verlässt oder in den Innengliedern, möglicherweise noch in den Epithelzellen Verwendung findet. Dass das Sehweiss durch Licht noch weiter verändert werde zu einer anagenetisch nicht mehr brauchbaren Substanz, ist unwahrscheinlich, weil lange Fortsetzung der Belichtung, nach einmal erzielter Totalbleichung, weder im lebenden Auge, noch an der epithellosen Retina hinsichtlich der regenerativen Processe oder der Fluorescenz garkeine weiteren Aenderungen erzeugt. Ist das Sehweiss aus den Stäbchencylindern geschwunden, so tritt erst bei starker Dämpfung oder Entziehung des Lichtes Rückfärbung ein; diese ist neogenetisch und von äusserst langsamem Verlaufe.

Das Material, woraus der Sehpurpur neogenetisch entsteht, oder welches dabei thätig ist, muss farblos sein, da das Fuscin und Lipochrin des regenerirenden Epithels, an die gedacht werden könnte, in dessen Lösungen nicht mit übergehen und da beide den Albinos fehlen, deren Netzhäute sich im Dunkeln gerade so gut wieder färben, wie andere. An das Lipochrin wäre auch um so weniger zu denken, als dasselbe dem Retinaepithel der meisten Thiere fehlt. Es kann sich für den Process nur um das farblose Protoplasma der Epithelien handeln, das wie eine flach ausgebreitete, Purpur erzeugende Drüse sämmtlichen Stäbchen angeschmiegt ist. Bei der auffallenden Uebereinstimmung der Myeloïdkörner mit dem Myeloïd der hinteren Abschnitte der Stäbchencylinder und bei dem benagten Aussehen fast aller Stäbchenkuppen ist eine Beziehung dieser Theile zu einander wol zu erwägen, um so mehr, als die Myeloïdkörner unter den Vögeln ausschliesslich den Eulen zukommen, deren Stäbchen am meisten entwickelt und am purpurreichsten sind; dass jene Körner aber Generatoren des Purpurs seien, steht so lange dahin, als sie bei den meisten Thieren vermisst werden, oder so lange dort kein diffus im Protoplasma verbreitetes Myeloïd erkannt ist, welches darin freilich enthalten sein könnte.

4) Lebensbedingungen des regenerirenden Epithels.

Die lange Dauer der Neogenese kann am wenigsten im Vergleiche mit der schnelleren, wesentlich auf Rhodophylaxe hinauskommenden Anagenese auffallen, und wird sehr verständlich, wenn man die gewiss nicht unerhebliche materielle Ausgabe, welche sie jeder Epithelzelle zumuthet, erwägt. Wie langsam der Process verlaufe, ist auch an Netzhäuten zu sehen, die ihr Sehweiss nicht ein-

büssen konnten, wenn man sie nämlich nach der Isolation ausbleicht und in ein besonntes, der eigenen entfärbten Retina beraubtes, fremdes Froschauge, gegen dessen mit Hülfe von Oedem im Grunde zurückgehaltenes Epithel legt; hier bedarf es mehr als einer, meist 2 Stunden bis die künstliche Neufärbung glückt. Andere Gründe für die Langsamkeit dieser Rhodogenese sind in Veränderungen der Epithelien durch das Licht zu suchen, welches diese nach seinem Durchgange durch die Stäbchen trifft, vermuthlich in einer, zunächst im chemischen Sinne zu nehmenden, Lichtempfindlichkeit ihres Protoplasmas, wofür manches spricht. Im Allgemeinen ist intensive Belichtung des nackten Epithelgrundes schon wenig geeignet, dessen Fähigkeit angelegte Stäbchenschichten wiederzufärben, zu erhalten, man dürfte sich also nicht wundern, wenn das den Epithelzellen durch die Stäbchen in situ zukommende Licht, welches nicht in der Weise, wie am entblössten Epithel, durch die zusammensinkenden, fuscinreichen Zellfortsätze am Zutritte gehindert wird, die regenerativen Vorgänge noch mehr verzögerte. So lange die Stäbchen nicht gebleicht sind, erhält das Epithel hauptsächlich rothes und violettes, etwas später rothes und gelbes Licht, dessen Strahlen auf die Stäbchenfarbe auch im Leben am wenigsten und natürlich noch weit schwächer, als auf die der epithellosen Netzhäute wirken. Besondere Versuche am Kaninchen und am Frosche haben ergeben, dass die rothen Strahlen wenigstens den regenerativen Vorgängen sehr wenig nachtheilig sind; rothes Licht leistet in der Beziehung zwar nicht mehr, als Dunkelheit, kann aber bei mittlerer Intensität solchen Grades, dass es immer noch als hell empfunden wird, Lichtentziehung ersetzen, so dass eine vorher durch anderes Licht gebleichte Netzhaut darin fast in derselben Zeit ihre Normalfarbe wieder gewinnt, wie wenn man das Auge ganz im Dunkeln gehalten hätte. Dennoch ist für Frösche eine Helligkeit rothen Lichtes herauszufinden, welche an sich nicht ausreicht die Netzhaut von Dunkelfröschen zu bleichen und doch die Regeneration anderer von gewöhnlichem Lichte vorher gebleichter nicht aufkommen lässt; bei den letzteren tritt dann nach mehrstündiger Rothbelichtung der interessante Fall ein, dass der Purpur sich doch nur etwa in dem Maasse bildet, als er durch dieses Licht zerstört worden, denn wenn man die Thiere schliesslich ins Dunkle setzt und nacheinander von 5 zu 5 Min. untersucht, so findet man ihre Retina jedesmal besser gefärbt und nach 15—20 Min. wieder von normalem Purpurgehalte.

Nur bei den Warmblütern scheint die Regeneration mit der Blutcirculation oder wenig später zu erlöschen; man findet sie merklich verzögert nach Druck auf den Bulbus, nach starken Blutentziehungen,

nach kräftigen, gefässverengend wirkenden electrischen Reizen am Auge. Dagegen scheint sie nicht beeinflusst zu werden von den meisten Erregungs- und Lähmungszuständen, welche an den Nerven des Auges zu erzielen sind. HOLMGREN[1] constatirte den Netzhautpurpur noch bei Kaninchen, deren N. optici vor mehr als einem Jahre in der Schädelhöhle durchschnitten worden. LANGENDORFF[2] fand dasselbe bei Fröschen, denen er Monate zuvor den Sehnerv in der Orbita zerschnitten hatte. Die nach HOLMGREN's Methode operirten Kaninchen zeigen lange Zeit nachher bezüglich der Ausbleichung und Wiederfärbung vollkommen normales Verhalten.[3] Durchschneidung des N. trigeminus, des N. sympathicus am Halse, des N. oculomotorius in der Schädelhöhle ändern nichts an der Regeneration, ebensowenig Vergiftung mit Curare oder grossen Dosen Atropin (auch beim Hunde). Reizung des andern Auges durch Licht oder Belichtung benachbarter Stellen auf derselben Retina lassen keine Aenderungen im Gange des Processes entdecken. Dagegen wirken kleine Dosen Muscarin oder Pilocarpin bei Hunden und Kaninchen merkwürdig beschleunigend auf die Rückkehr der Stäbchenfärbung, so sehr, dass die überexponirte Netzhaut spätestens nach 20 Min. im Dunkeln wieder maximal gefärbt erscheint. In Uebereinstimmung mit vielen der erwähnten Thatsachen spricht die Wirkung der letzteren, alle echten Secretionen mächtig fördernden Gifte für eine den secretorischen sehr ähnliche Function des wichtigen Deckepitheliums der Sehzellen.

1 FR. HOLMGREN, Ueber Sehpurpur und Retinaströme. Unters. aus dem physiol. Instit. z. Heidelberg II. S. 81.

2 O. LANGENDORFF, Arch. f. Anat. u. Physiol. Physiol. Abth. 1877. S. 437.

3 W. C. AYRES und W. KÜHNE, Ueber Regeneration des Sehpurpurs beim Säugethiere. Unters. aus dem physiol. Instit. z. Heidelberg II. S. 215. Mehrere der im Texte angeführten Thatsachen nach noch unpublicirten Beobachtungen von W. C. AYRES.

DRITTES CAPITEL.

Bedeutung der photochemischen Processe für das Sehen.

I. Optochemische Hypothese.

Insofern photochemische Hypothesen des Sehens zunächst photochemische Processe in der Retina voraussetzen, ist denselben durch die zahlreichen, vom Lichte abhängigen, unzweifelhaft chemischen Vorgänge in der Netzhaut eine thatsächliche Grundlage gegeben und damit dem ersten Erfordernisse für das weitere Eindringen in den wunderbaren Uebergang objectiver Aetherbewegung zu schliesslich subjectiver Lichtempfindung genügt. Um hier Boden zu fassen, ist es unerlässlich die bis jetzt bestandenen allgemeineren Vorstellungen, welche nur bis zur Annahme eines photochemischen Gliedes in der ganzen Vorgangskette zwischen Ankunft des Lichtes und Anfang der nervösen Erregung gehen konnten, greifbar zu gestalten und sowohl in zeitlichem wie in örtlichem Sinne zu präcisiren.

Da die heutige allgemeine Nervenphysiologie nach der Ueberzeugung Aller im Begriffe steht, neben der Nervenphysik eine Nervenchemie zu entwickeln und Niemand an der wesentlich chemischen Natur des Leitvorganges in der Nervenfaser, sowie aller Hauptverrichtungen in der Nervenzelle zweifelt, so ist dies auch auf den retinalen Leitapparat zu übertragen. Die chemische Veränderlichkeit der grauen Retinasubstanz wäre daher in einer allgemeinen Nervenchemie zu erörtern, und ist hier besonders nicht am Platze, weil es sicher ist, dass das Licht keine directe Beziehung dazu hat und weil ihre Berücksichtigung von der Hauptfrage der phototropen Vorgänge ablenken würde.

Sinnesorgane bestehen peripherisch vorwiegend aus Nervenenden in Epithel und dieses ist verschieden je nach dem Reize, von welchem es am leichtesten getroffen wird. Mit der Epithelzelle, in deren Protoplasma die leitende Nervenfaser, wie es scheint unter allmählichem Wandel ihrer chemischen Structur übergeht, erhielt der Nerv im Gehörorgan eine auf mechanische Erschütterung leicht ansprechende Endbildung, im Riech- und Schmeckepithel durch gewisse chemische Einflüsse geradezu unglaublich veränderliche Endapparate,

in der Netzhaut die phototrope Einrichtung. Hier anknüpfend erachtet die optochemische Hypothese die Sehzellen als Träger photochemisch zersetzlicher Stoffe, die daselbst als Sehstoffe[1] zu bezeichnen sind und nimmt von diesen so lange keine Fähigkeit an, den irritablen Theil der Sehzellen, welcher durch das Protoplasma des Innengliedes vorgestellt wird, chemisch zu erregen, als sie unzersetzt bleiben. Dagegen schreibt die Hypothese den Zersetzungsproducten, deren Auftreten mit dem Zugange des Lichtes begonnen, das Vermögen zu, Sehzellenprotoplasma chemisch zu reizen und bezeichnet jene Producte als Sehreger. Sehpurpur ist darnach ein Sehstoff, dessen Sehreger Sehgelb und Sehweiss sind. Der Reiz könnte zwar auch in dem Umwandlungsprocesse der Sehstoffe gesucht werden[2], da dieser aber höchst wahrscheinlich mit dem Momente der Entziehung des Lichtes abschliesst, während das Auge an Nachempfindung bekanntlich jedes andere Sinnesorgan überbietet, scheint die, wenn man will, mehr stoffliche Auffassung des Erregungsmittels den Vorzug zu verdienen.

Indem wir die bis jetzt erkannten chemischen Veränderungen der Netzhaut heranziehen, ist zunächst und nachdrücklichst Gewicht auf deren ausschliessliche Abhängigkeit vom Lichte zu legen. Durch welche Mittel der Sehpurpur sonst zersetzlich sein möge, im Auge und unter allen einigermaassen natürlichen Verhältnissen wird er durch keine andern Einflüsse afficirt oder von seinem Platze entfernt (vergl. oben S. 298); es kann also gar nicht daran gedacht werden seine Zersetzung etwa mit der in Muskeln, Nerven oder andern irritablen Dingen als Folge von Reizung und Thätigkeit eintretenden chemischen Veränderung, wie der Säuerung z. B. zu vergleichen. In der sehenden Netzhaut ist die photochemische Zersetzung des Sehstoffes der erste Vorgang, welchem der Reiz erst folgt.

Um einen Bestandtheil der Netzhaut als Sehstoff anzusprechen, genügt es nicht, dass er lichtempfindlich sei, während andererseits die Zersetzlichkeit eines solchen durch Licht minimal und doch für seine Zwecke genügend sein könnte. Der gelbe Farbstoff der Macula lutea ist in mittlerem Grade lichtempfindlich, kann aber nicht für einen Sehstoff gelten, weil er nur in den vorderen Schichten, nicht in den Sehzellen vorkommt. Hier findet sich also schon ein retinaler Farbstoff ohne die Bedeutung eines Sehstoffes, dessen Lichtem-

1 Der sehr zweckmässige Name „Sehstoff“ wurde von S. Exner eingeführt; vgl. Arch. f. d. ges. Physiol. XVI. S. 409.

2 In dieser Weise ist die optochemische Hypothese zuerst von J. Bernstein (a. a. O.) ausgesprochen.

pfindlichkeit zunächst so gut übergangen werden kann, wie etwa die der Gallenpigmente, und dessen Bleichungsproducte gewiss nicht als Sehreger fungiren, womit natürlich nicht gesagt ist, dass dieselben nicht solche werden könnten, wenn sie an den richtigen Platz d. h. in die Sehzellen gelangten. Das Lipochrin der gelben Oelkugeln einiger Retinaepithelien und das Fuscin aller retinalen Pigmentepithelien sind Beispiele für z. Th. zwar schwer durch Licht zersetzliche Materien in der Netzhaut, die sich ebenfalls an einem Orte befinden, der für das directe Sehen kaum in Frage kommt, so gross ihre Bedeutung für diffuse Lichtempfindungen und namentlich nach dem Lichtreize sein könnte. Als dritten Fall sehen wir besonders bei den Vögeln in den Sehzellen und zwar nur in den Zapfeninnengliedern Pigmente mittlerer Lichtempfindlichkeit, von der aber im lebenden Auge nicht einmal Andeutungen zu bemerken sind, da sich die Farben nach Blendungen sogar vertiefen. Hier entsteht die Frage, ob Pigmente in der Netzhaut nicht überhaupt wesentlich die Bedeutung haben, nur Licht gewisser Wellenlängen als Angriffsmittel an hinter ihnen liegende, phototrope Theile gelangen zu lassen, eine Function, welche M. SCHULTZE den farbigen Zapfenkugeln zuerst zuschrieb. Damit ist ein Gedanke bezeichnet, der mit gleichem Rechte auch auf den Sehpurpur passen könnte, den seine eminente Lichtempfindlichkeit noch keineswegs vor dem Verdachte bewahrt, kein Sehstoff, sondern nur ein für hinreichend intensives Licht veränderlicher Farbenschirm zu sein, was für mit ihm gemischte, ebenfalls in den Stäbchencylindern befindliche, wirkliche Sehstoffe die grösste Bedeutung haben könnte. Die optochemische Hypothese kann mit der Annahme von Sehstoffen und Sehregern das Richtige treffen, ohne dass der Purpur ein Sehstoff zu sein braucht. Der Sehpurpur ist also nicht sicher eines Tages seinen Namen gegen den weniger präjudicirenden „Stäbchenpurpur" eintauschen zu müssen, wenn die heute von ihm ausgehenden Hoffnungen sich zwar erfüllen, aber, wie es so oft geschieht, in ganz anderer Richtung bewahrheiten sollten. Wenn man erwägt, wie die Hypothese, dass die Erregung der Netzhaut durch Licht auf chemischer Reizung beruhe, schon für bewiesen erklärt worden, als man noch nicht einmal wusste, dass hinter der langsamen Netzhautbleiche von der Sonne geblendeter Frösche locale Lichtwirkung stecke, und als es noch zweifelhaft war, ob die Stäbchenfarbe keine Interferenzfarbe sei[1], so scheint ein Wort der Warnung vor solchen Täuschungen um so berechtigter, als es heute, da wir photochemische Processe in der Retina wirklich kennen, noch am Platze ist.

1 Vgl. KUNKEL, Arch. f. d. ges. Physiol. XV. S. 38.

1. *Sehen ohne Sehpurpur.*

Unzweifelhaft wird ohne Sehpurpur gesehen, denn noch wurde bei keinem sehenden Wirbellosen Sehpurpur gefunden und Niemand bezweifelt, dass die Zapfen sehen, welche ohne Ausnahme purpurfrei sind. Dass Zapfen Alles sehen, was für uns sichtbar ist, wissen wir, weil wir mit der Fovea centralis, die nur Zapfen enthält, sogar am besten sehen; auch diese, fast nach Stäbchenart, mit langen schlanken Aussengliedern versehenen Zapfen sind nach langem Dunkelaufenthalte frei von Sehpurpur und völlig farblos (vgl. S. 290). Ausserdem giebt es auch Stäbchen ohne Sehpurpur, wie bei Hühnern und Tauben, bei einigen Fledermäusen und im Umkreise der Ora serrata. Von diesen wissen wir freilich nicht, ob sie sehen, müssen es aber für einen Theil derselben wol als sehr wahrscheinlich voraussetzen. Fasst man die Frage allgemeiner, ob es Sehorgane gebe ohne alle Farbstoffe, so muss auch diese bejaht werden, weil die Zapfen in der Thierreihe zum grossen Theile pigmentlos sind und weil bei den Schlangen Augen existiren, die nur farblose Zapfen, gar keine Stäbchen enthalten. Will man noch weiter gehen und die Frage bis auf das Retinaepithel ausdehnen, so bleibt die Antwort, unter Berufung auf die Zapfen albinotischer Geschöpfe und auf solche, welche vor einem Tapetum stehen, die nämliche; bei albinotischen Menschen, die in genügend gedämpftem Lichte gut sehen, liegt in der Fovea ein vollkommenes Sehorgan vor, das weder vor noch hinter sich irgend etwas Farbiges besitzt, da sich das vordere Gelb der macula lutea nur bis zum Rande der Grube erstreckt. Die optochemische Hypothese ist hiernach unbedingt auf die Annahme auch farbloser Sehstoffe angewiesen.

In den meisten Augen sind es zweierlei Sehzellen, die sich am Sehen betheiligen, die Stäbchen und die Zapfen und für diese ist zunächst festzustellen, ob sie noch sehen, wenn der Purpur verschwunden ist. So wahrscheinlich dies für das menschliche Auge sein mag, welches darüber sicher entscheiden müsste, so wenig lässt es sich nachweisen. Wir sind ausser Stande die Stäbchenfarbe im lebenden Auge des Menschen mit dem Augenspiegel zu constatiren. O. Becker[1] versuchte vergeblich Unterschiede der rothen Leuchtfarbe des Augengrundes vor und nach der Einwirkung von Licht, dem man die Bleichung glaubte zutrauen zu müssen, zu erkennen und überzeugte sich an Thieraugen, auf deren Netzhaut ein sehr deutliches, nachträglich

1 O. Becker a. a. O.

bei der Section gefundenes Optogramm erzeugt worden, dass purpurhaltige und purpurfreie Stellen weder vor dem pigmentirten, noch vor dem albinotischen Augengrunde auf der blutführenden Fläche ophthalmoscopisch zu unterscheiden seien, womit die Frage nach der Sichtbarkeit des Sehpurpurs in situ und im lebenden uneröffneten Auge ein für alle Male verneinend entschieden ist. Da es v. Bezold und Engelhardt[1] nicht gelang, mit Hülfe der von ihnen erfundenen, zur farbigen Beleuchtung und zur Erkennung von Farben vorzüglichen ophthalmospectroskopischen Einrichtung andere Lichtabsorption, als die vom Blute bedingte im Augengrunde zu finden, so werden auch die Hoffnungen die An- oder Abwesenheit des Purpurs beim lebenden Menschen etwa auf Umwegen zu constatiren, sehr gering. Zwar gelang es A. Ewald[2] ähnlich wie Tait[3] und Boll[4] des Morgens beim Erwachen eine Andeutung des eigenen Purpurs entoptisch wahrzunehmen und durch die Lage des rosenfarbenen Hofes um den, von ihm zuerst entoptisch gesehenen, gelben Flecken, welcher der Macula lutea entsprach, zu beweisen, dass die Wahrnehmung vom Sehpurpur herrührt, die Erscheinung ist jedoch zu flüchtig und zu schwer erreichbar um sie als Prüfungsmittel zu verwenden. Meine an zahlreichen frischen menschlichen Augen gewonnenen Erfahrungen machen es wahrscheinlich, dass die, isolirt freilich keinem thierischen Sehpurpur an Lichtempfindlichkeit nachstehende Netzhautfarbe des Menschen, im Leben bedeutend resistenter ist, als bei allen bis jetzt darauf untersuchten Thieren, so dass erheblich kräftigere regenerative Vorgänge für den Menschen vorauszusetzen sind.

An Thieren ist es leicht zu entscheiden, dass sie mit ausgeblichener Netzhaut noch sehr gut sehen und selbst Farben erkennen. Gründlich besonnte Frösche fangen im Sonnenscheine Fliegen mit sicherem Sprunge, was ein augenloser Frosch niemals thut und wenn man sie unter einen halb blauen, halb grünen Glasdeckel setzt, unter welchem sich der Sehpurpur nicht regenerirt, sondern vorhandener in gleicher Zeit ausbleicht, so suchen die Thiere nach einigen Minuten mit erstaunlicher Constanz und mit Ueberwindung erheblicher, in den Weg gelegter Hindernisse die ihnen am meisten zusagende grüne Belichtung auf. Damit wird freilich nicht entschieden, ob ihre farblos gewordenen Stäbchen noch sehen, weil sie Dasselbe vermuthlich mit ihren Zapfen allein erreichen würden; wenn man aber

1 Engelhardt a. a. O.

2 A. Ewald, Ueber die entoptische Wahrnehmung der Macula lutea und des Sehpurpurs. Unters. aus dem physiol. Instit. z. Heidelberg II. S. 241.

3 Tait, Edinburgh. Proceedings VII. p. 605. 1869—70.

4 Boll Arch. f. Anat. u. Physiol. a. a. O.

Kaninchen, welche keine Zapfen oder keine purpurfreien Sehzellen zu besitzen scheinen, mit völlig ausgeblichener Netzhaut, beim Aufenthalte im Lichte beobachtet, so überzeugt man sich, dass sie ganz gewiss sehen. Sie fallen nicht von einem hohen Brette ohne Sprung herunter, stürzen im Laufe nicht gegen Hindernisse oder in senkrecht abfallende Gruben, wie es blinden Kaninchen begegnet und sind im Stande über lange schmale Latten zu laufen, von welchen blinde gleich herabgleiten. Dies dürfte es sehr wahrscheinlich machen, dass auch Stäbchen ohne Sehpurpur sehen und man würde daher in diesem Augenblicke Niemanden widerlegen können, der behauptete der Sehpurpur sei gar kein Sehstoff. Die optochemische Hypothese ist also genöthigt auch in den Stäbchen farblose Sehstoffe anzunehmen, womit natürlich nicht gesagt wird, dass ein unter gewissen Bedingungen in den Stäbchen vorhandener gefärbter Körper, wie der Purpur, kein Sehstoff sei.[1]

2. *Hypothese mehrfacher Sehstoffe.*

Nur mit dem Gehörorgane theilt das Auge die Eigenthümlichkeit auf Erregungen geradezu colossaler Intensitätsdifferenzen im gewöhnlichen Gebrauche reagiren zu müssen. Wir sehen und unterscheiden Licht verschiedener Wellenlängen und erkennen an diesem, wie am gemischten Lichte Intensitätsdifferenzen mit grösster Feinheit; wenn dieses Vermögen über und unter gewissen Grenzen auch merklich abnimmt, so ist doch der Spielraum innerhalb jener Grenzen ein enormer und die Anwesenheit feiner Empfindung bei äusserst schwachem Lichte unmittelbar nach ausserordentlich kräftiger Belichtung zweifellos. Dass solchen Aufgaben ein einzelner, elementarer Sinnesapparat gewachsen sei, ist schon schwer begreiflich, ganz unbegreiflich aber würde es sein, wenn er denselben mit einem einzigen Mittel, oder mit e i n e m Sehstoffe genügte. Wir können uns die chemische Veränderlichkeit oder Erregbarkeit des Sehzellenleibes so gross vorstellen, dass sie nur durch den Vergleich mit der den Riechzellen des unglaublich feinspürigen Geruchsorgans

1 Holmgren (Unters. a. d. physiol. Inst. z. Heidelberg a. a. O.) fand, dass durch Licht entpurpurte Augen des Kaninchens bei erneuter Belichtung noch Schwankungen der electrischen Retinaströme zeigen und schliesst daraus, sowie aus der electromotorischen Unwirksamkeit abgestorbener oder alaunisirter, purpurhaltiger Augen während der Lichtbleiche, dass der Sehpurpur mit dem Sehen nichts zu schaffen habe. Auf die erstere Thatsache finden dieselben Betrachtungen Anwendung, wie die auf das Sehen ohne Sehpurpur bezüglichen, während die letztere Beobachtung ausserhalb der Discussion steht, da weder eine electrische Wirkung von dem chemischen Processe der Rhodopsinbleiche an sich vorauszusetzen, noch das Herkommen der Retinaströme von den S e h z e l l e n nachgewiesen ist.

mancher Thiere zukommenden, einigermaassen fassbar wird und würden es dann verständlich finden, wenn ein Sehstoff etwa von der geringen photochemischen Zersetzlichkeit des Fuscins zum Sehreger dafür würde. Andererseits können wir von der erstaunlichen Zersetzlichkeit des Sehpurpurs am Lichte ausgehen und es sehr begreiflich finden, wie äusserst schwaches Licht unter Benutzung dieses fein rea girenden Mittels das Sehzellenprotoplasma chemisch erregend trifft. Was wir uns aber nicht vorstellen können ist, dass ein Sehstoff von den Eigenschaften des Sehpurpurs das Mittel sei, welches ein so hoch empfindliches Protoplasma bei intensiverem Lichte bedürfe oder brauchen könne, ohne in verderblich maximale Erregung zu gerathen, wenn nicht die für den gerade jetzt entstandenen Sehreger vorhandene Erregbarkeit eine relativ geringe ist. Damit sind wir wieder auf die Hypothese mehrfacher Sehstoffe und ebensovieler, daraus entsprungener Sehreger geführt. Immerhin brauchen die Erregbarkeitsunterschiede gegen chemisch verschiedene Sehreger keine sehr grossen zu sein, denn das Auge verträgt bekanntlich allmählich gewöhntes und dann sehr angenehmes Licht, äusserst schlecht, wenn es plötzlich nach längerem Dunkelaufenthalte dazu gelangt und nachdem sich der vermuthlich zersetzlichste aller Sehstoffe, nämlich der Sehpurpur in grosser Menge darin angehäuft hat. Wir wissen was es heisst, ein wirklich ausgeruhtes Auge plötzlich dem gewöhnlich gebräuchlichen oder selbst viel schwächerem Lichte auszusetzen, da widerwärtige Blendung und Unfähigkeit zu weiterem Sehen die nächste Folge sind.

II. Phototrope Erregungen in der Netzhaut.

Irritable Gewebe durch bleichenden Sehpurpur zu reizen wurde vergeblich versucht. Gebleichte Frosch- und Säugernetzhäute schmecken auf der Zunge zerdrückt ebenso indifferent, wie purpurne. Muskeln und Nerven mit dem Querschnitte der purpurnen Stäbchenschicht angeschmiegt, werden nicht erregt, wenn plötzlich Sonnenlicht zutritt und sind nicht mittelst Purpurcholatlösungen während und durch deren Bleichung zu reizen, wenn die Galle verdünnt genug ist, um an sich keine Erregung zu veranlassen. Auf die Haut reflexempfindlicher Frösche mit der Stäbchenseite gelegte Retinae erzeugen beim Zutritte des Lichtes keine Reflexbewegungen.

Nach diesen negativen Befunden und während so wenig Aussichten vorhanden sind, eine n u r durch den Purpur vermittelte Erregung im Auge nachzuweisen, wie gegenwärtig, ist um so mehr Gewicht auf ein auch vom Lichte abhängiges Reizungs- und Bewegungs-

phänomen im Netzhautepithelium zu legen, das die ersten Andeutungen objectiv erweislicher, photochemischer Reizung nicht nur für das Auge, sondern für die gesammte organisirte Natur enthält. Die Erscheinung gehört dem Pigmentepithel an.

Das von BOLL zuerst an belichteten Froschaugen bemerkte Ausschlüpfen der Retina im zerfetzten und epithelbedeckten Zustande beruht nicht auf einer Consistenzveränderung oder Erweichung der Membran, welche von BOLL[1] angenommen, aber schon (vergl. oben S. 301) widerlegt worden, sondern auf der von CZERNY[2] zuerst vermutheten Beweglichkeit des Protoplasmas der retinalen Epithelzellen und deren Fortsätze. Nachdem ich auf das Umherwandern und auf die „Abschichtung" der Fuscinnadeln zwischen den Stäbchen der lebenden Netzhaut im Zusammenhange mit der Belichtung und den restitutiven Vorgängen nach der Belichtung[3] aufmerksam gemacht, und BOLL sich dieser Auffassung im Wesentlichen wortgetreu[4] angeschlossen hatte, gelang es durch sichere Methoden diese merkwürdigen Vorgänge genauer zu ermitteln und ihre Abhängigkeit von einer grösseren Anzahl das Auge treffender Einflüsse festzustellen.

Ausser der directen Betrachtung in gewöhnlicher Weise, nach Lockerung der Opticusverbindung, unversehrt ausschlüpfender Netzhäute sind hier Scheerenschnitte durch die gesammten, in situ erhaltenen Gewebe des Augengrundes und feinste meridionale Durchschnitte gehärteter Froschaugen zu verwenden. Die Härtung darf nicht in Alkohol geschehen, welcher meist vollkommen unnatürliche Trennungen des Epithels von den Stäbchen, unter Einschrumpfung der Fortsätze gegen den Zellenleib, wie dieselbe im Leben niemals vorkommt, erzeugt, sondern wird mittelst der H. MÜLLER'schen Mischungen aus Natriumbichromat und Natriumsulphat und nachträglicher Alkoholbehandlung bewirkt. Die Uebereinstimmung des Befundes an Scheerendurchschnitten und Umschlagrändern frischer Netzhäute, mit dem an so gehärteten Objecten bürgt für die Erhaltung der natürlichen Verhältnisse nach der genannten Behandlung.

Abschichtungen im Epithelprotoplasma.

Im Allgemeinen ist der Satz: belichtete Netzhäute bleiben leicht vom Epithel bedeckt, während dunkel gehaltene gewöhnlich pigmentfrei ausschlüpfen, richtig, aber er drückt weder den ganzen Sachverhalt

1 BOLL, Monatsber. d. Berliner Acad. 1877. 11. Jan. Zusatz vom 15. Febr.
2 CZERNY, Sitzgsber. d. Wiener Acad. LVI.
3 W. KÜHNE, Ueber den Sehpurpur a. a. O. I. S. 21 u. 101.
4 Centralbl. f. d. med. Wiss. 1877. S. 408 Autoreferat, und Arch. f. Anat. u. Physiol. a. a. O.

aus, noch bezeichnet er alle wesentlichen Bedingungen, unter welchen epithelfreie und epithelführende, schwarze und ungeschwärzte Netzhäute aus dem Bulbus kommen. Hinsichtlich des Verhaltens der Stäbchen- und Epithelschicht ist Folgendes zu unterscheiden: 1. das Haften der beiden Schichten aneinander[1], 2. die Vertheilung des Fuscins in den Epithelzellen und ihren Fortsätzen, 3. die Gestalt und Lage der Fortsätze, 4. der Schwellungsgrad der Stäbchen. Von Einfluss hierauf sind 1. das Licht, 2. die Temperatur, 3. ödematöse Zustände, 4. der Tod oder die Exstirpation des Bulbus. Um den Einfluss von Licht und Dunkelheit möglichst klar herauszuschälen gedenken wir zuerst der übrigen wirksamen Einflüsse. In jedem Froschauge, das $^1/_4$—$^1/_2$ Stunde im abgeschnittenen Kopfe, oder exstirpirt und feucht erhalten verweilte, haftet das Epithel ungefähr zu der Zeit, wo der Bulbus sichtlich an Spannung verloren, fest an der Stäbchenschicht. Fig. 9a zeigt den Durchschnitt aus dem ganz frisch gehärteten Auge eines im Dunkeln gehaltenen, mit Curare vergifteten, nicht ödematösen Frosches, Fig. 9 b von demselben Frosche, dessen Auge eine Stunde nach der Exstirpation gehärtet worden. Wie man sieht ist das Pigment während der Entwicklung des Haftens in grösserer Menge nach vorn gewandert und mit kleinen Antheilen selbst zwischen die Innenglieder der Stäbchen, bis an die M. limitans ext. vorgeschritten.

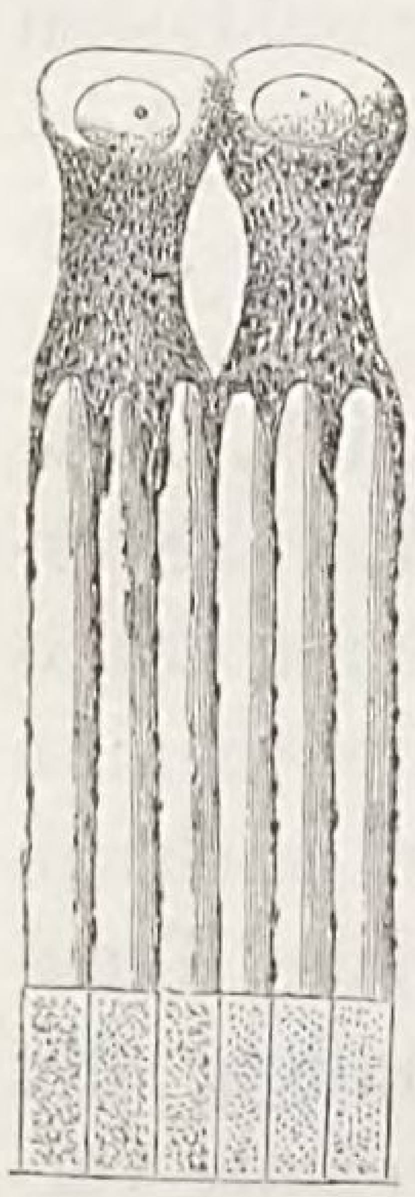


Fig 9a.

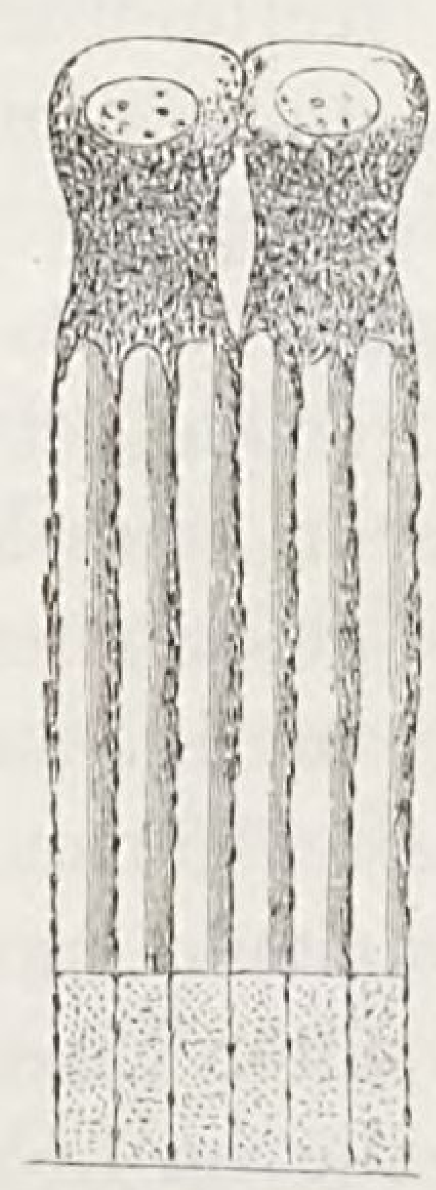
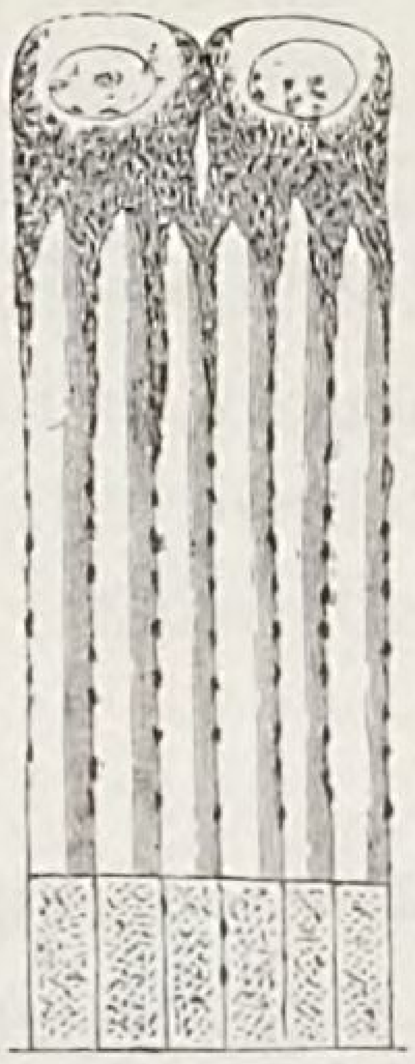


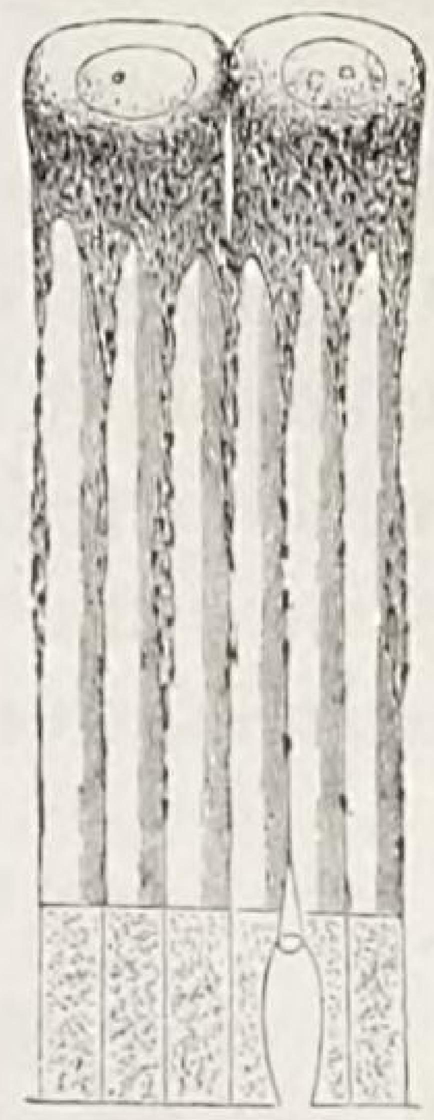
Fig. 9b.

Bei Dunkelfröschen entwickelt sich das Haften des Epithels auch im Leben, wenn die Temperatur niedrig ist, bei 0° in der Regel auf der ganzen Membran, bei etwas höheren Temperaturen mehr theilweise und seitlich, oft nur in einem Quadranten bis zum Centrum der Retina reichend. Das Abkühlen ist kein so sicheres Mittel, wie das Liegenlassen der exstirpirten Bulbi; in der ersten Stunde wirkt es besser, als bei längerer Dauer. Fig. 10 von einem in Eiswasser gehaltenen Dunkelfrosche, zeigt mit der vorigen Fig. verglichen, das Pigment spärlich zwischen den Stäbchen verbreitet und kein Fuscin zwischen den Innengliedern. Hier ist das Haften also von der Pigmentver-

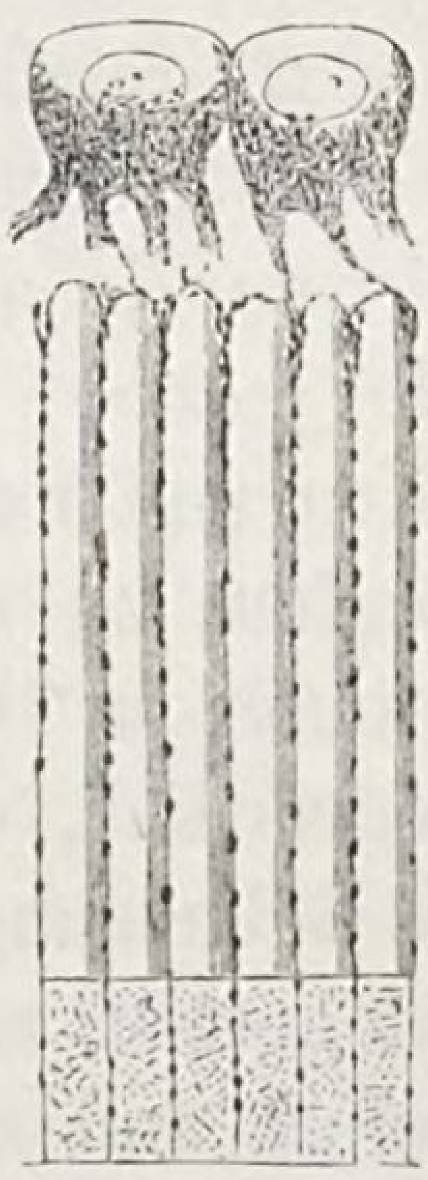
1 Hierzu ist zu bemerken, dass Retinae mit fester verbundener Epithel- und Stäbchenschicht auch in der Regel stärker an der Chorioïdea adhäriren, und dass sie mit grösserer Vorsicht, als andere von dieser abgehoben werden müssen, schon weil sie am meisten geneigt sind die Epithelkuppen oder deren Hüte im Augengrunde zurückzulassen.

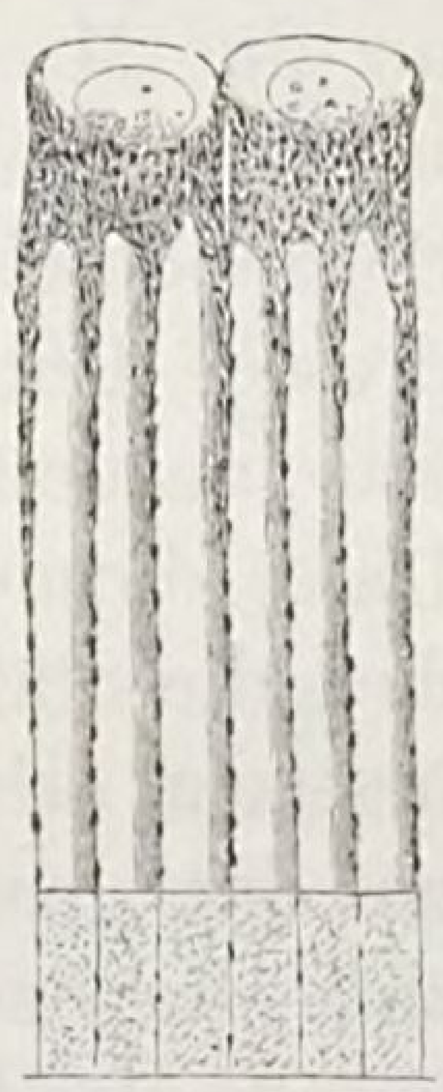
breitung unabhängig und könnte auf innigerer Verklebung farbloser Epithelfortsätze mit den Stäbchen oder auch darauf beruhen, dass die Fortsätze resistenter geworden und schwerer zerreissen. Wie sehr die Abkühlung trotz einzelner beobachteter Unregelmässigkeiten das Haften befördert, erhellt am besten daraus, dass es noch in demselben Sinne wirkt, wenn ausser dem Dunkelaufenthalte noch ödematöse Zustände, welche unter allen Verhältnissen am meisten zur Lockerung der betreffenden Schichten beitragen, im entgegengesetzten Sinne wirken. Fig. 11 zeigt, wie dann das Pigment vertheilt ist: es reicht zwar selten weit nach vorn, ist aber in ziemlicher Menge, etwa in der Mitte der Stäbchenhöhe, in Gestalt spindelförmiger Figuren angehäuft.


Fig. 10.


Fig. 11.

— Das Curareödem mit der gleichwirkenden Temperaturerhöhung auf etwa 30° C. combinirt erzeugt bei Dunkelfröschen, trotz der überaus beförderten Lockerung der Netzhaut von der Epithelschicht, weiteres Vorschreiten des Pigmentes zu den Innengliedern, unter Auftreten ganz schmaler, aus Fuscinnadeln gebildeter Reihen zwischen den Stäbchen an deren ganzer Länge: vergl. Fig. 12. Diese Fortsätze der Epithelzellen reissen aber sehr leicht kurz vor ihrer Wurzel ab. Lockerung erzeugt das Oedem, besonders in der Wärme, ausserdem an besonnten Fröschen mit gebleichten Stäbchen, und wie Fig. 13 zeigt, indem nur geringe Pigmentmengen zwischen den Stäbchen bleiben, von welchen ein sehr kleiner Theil auch zwischen den Innengliedern liegt.


Fig. 12.


Fig. 13.

Hiermit sind die Mittel bezeichnet, die es giebt um das Epithel, den Einflüssen des Lichtwechsels entgegen, bei Dunkelfröschen haftend, bei Hellfröschen gelockert zu erhalten. Entspricht unter jenen Mitteln das Curareödem auch keinem natürlichen Zustande, so ist die Bekanntschaft mit seiner Wirkung doch sehr wichtig, weil die Curarelähmung für methodische Belichtungsversuche unumgäng-

lich ist und weil die bei besonnten Fröschen unvermeidliche Berieselung oft unabsichtlich zu Oedem führt. Welche Vortheile von dem Kunstgriffe, belichtete Netzhäute mittelst des Oedems epithelfrei zu erhalten, zu erzielen sind, erhellte schon früher. — Der Einfluss der Temperatur muss selbstverständlich bekannt sein, um überhaupt den Gegensatz des Epithelverhaltens im Dunkeln gegen das im Lichte erfassen zu können; was im Folgenden über den letzteren besonders wichtigen Unterschied mitgetheilt wird, bezieht sich daher auf Versuche, die bei möglichst gleicher Temperatur von etwa 20° C. angestellt wurden.

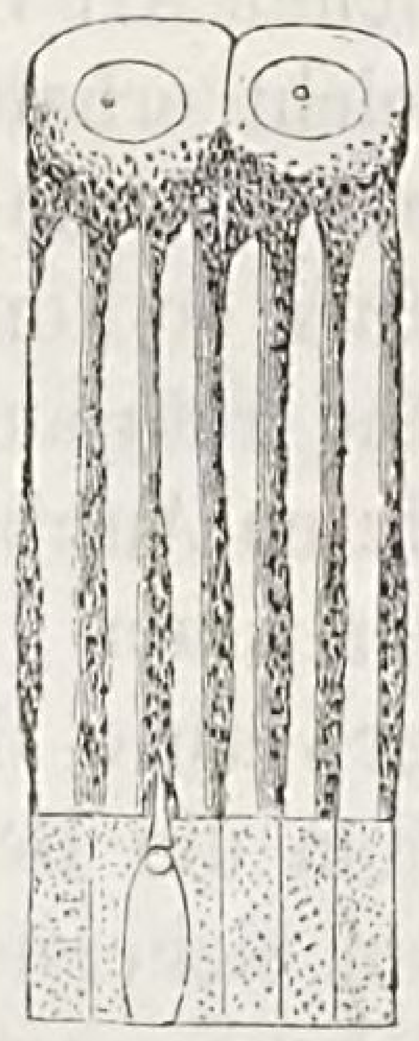
A) Verhalten des Pigmentepithels bei Dunkelfröschen.

Hier löst sich die Netzhaut leicht und vollkommen von der Epithelplatte ab. Gleichwohl sieht man an Schnitten gehärteter oder an Scheerenschnitten frischer Augengründe das Pigment in starken, kegelförmigen Massen zwischen die Stäbchen ragend, aber nicht weiter, als um etwa ein Drittel oder die Hälfte ihrer Länge. Zwischen den Innengliedern findet sich kein Pigment, auch nicht wo daselbst Zapfen auftreten. Die im Augengrunde zurückgebliebenen Epithelien, in Glaskörper, in dünnem Salzwasser oder in OsO_4 untersucht, zeigen sich mit entsprechend kegelförmigen, dunklen Fortsätzen behaftet, die in lange feine, fuscinfreie Fäden übergehen, welche theilweise so lang scheinen, dass sie gewiss bis zu den Stäbcheninnengliedern oder bis an die M. limitans ext. reichen würden. Trotz der lockeren Verbindung sendet also das Retinaepithel seine Ausläufer so tief in die Sehzellenschicht, wie nur je an einer untrennbar haftenden, mit dem grossen Unterschiede jedoch, dass jene Fäden nur an der Wurzel Fuscinnadeln enthalten und nach vorn keine Anschwellung besitzen. Unter diesen Umständen, zu welchen noch der in Betracht kommt, dass die Stäbchencylinder im Dunkeln den kleinsten Querdurchmesser besitzen, wird es begreiflich, dass die Zellen mit ihrem Barte leicht aus ihrer natürlichen Behausung entfernbar sind. Im Zellenleibe findet sich die Basis dicht gefüllt mit Pigment, das bis an die vordere Fläche des Kerns reicht und nur am Rande etwas in die Kuppe emporsteigt. Falls Abkühlung die Vertheilung des Fuscins im Zellenleibe nicht ändert, muss man aus dem Ansehen unbelichteter, gegen die Regel mit dem Epithel ausgeschlüpfter Netzhäute schliessen, dass die Stäbchenkuppen hier wenig vom Fuscin bedeckt werden, denn man sieht wenigstens die centralen Theile der Netzhaut und auch wol eine mehr peripherische, halbmondförmige Stelle, trotz des tief sammetschwarzen Aussehens bei schräger Stellung zum eigenen Auge,

recht so beschaffen, wie eine gläserne, durch schwarzen Flor geschlagene Bürste, wenn man senkrecht darauf blickt.

B) Verhalten des Pigmentepithels bei belichteten Fröschen.

Sind die Stäbchen durch Licht entfärbt, so fällt ausser dem Haften der Epitheldecke, in der Stäbchenschicht nach dem Abschaben jener, noch das tiefe Hineinragen dicker Pigmentschnüre und spindelförmiger Haufen von Fuscinnadeln auf, in Folge welcher die Membran stark grau oder braun tingirt aussieht. Es hat sich hier Vieles geändert: die Basis der Epithelzellen hat viel Fuscin auf Kosten der Füllung ihrer Fortsätze verloren, die ursprünglich kegelförmigen Pigmenthaufen in den Wurzeln der Fortsätze sind fast ganz verschwunden und in Gestalt spindelförmiger Anhäufungen an die vordere Hälfte der Stäbchencylinder gerückt, während ein Theil des Fuscins bis an die M. limitans vorgeschritten ist. Was im Zellenleibe vom Fuscin zurückgeblieben ist, hat sich dort anders gelagert und zwar so, dass die Stäbchenkuppen zum Theil mehr davon bedeckt werden, als im Dunkelauge; die ganze Retina sieht daher von der Epitheldecke betrachtet besonders dunkel aus, indem viel weniger Licht durch die Axen der Stäbchen in die Kuppen der Epithelzellen dringt. Wie ich es zuerst erklärte, finden also während des Lebens die auffallendsten Wanderungen des Pigmentes innerhalb der Epithelzellen und ihrer Fortsätze statt, wobei es sich in wechselnder Weise abschichtet. In dem eben beschriebenen Zustande findet man die meisten aus früherer Zeit stammenden Schnittpräparate der Retina mikroskopischer Sammlungen, an welchen gewiss schon Mancher die doppelte Pigmentzone bemerkte, deren eine der Basis der Zellenleiber entspricht, während die andere den vorderen spindelförmigen Fuscinhaufen in den Zellfortsätzen zwischen den Stäbchen angehört. Nach solchen Umlagerungen muss das Epithel der Stäbchenschicht offenbar fest anhaften, da jeder Zellfortsatz zwischen den Stäbchen mit einem Riegel versehen ist, der die Entfernung seiner weichen Masse verhindert und ihn bei Anwendung von Gewalt eher abreissen, als dieser folgen lässt. Nach längerer Belichtung kommt hierzu in der Schwellung der Stäbchen (vergl. oben S. 310) ein weiterer Umstand, der im gleichen Sinne wirken muss, weil die Epithelfortsätze jetzt fester in die verschmälerten Stäbchenzwischenräume eingeklemmt werden. Ist die Belichtung bei


Fig. 14.

0° erfolgt, so wird das Haften nicht wesentlich befördert und von Durchschnitten der Retina das Fig. 14 dargestellte Bild erhalten, welches für alle Hellretinae charakteristisch ist.

Das Haften des Epithels und die Einlagerung grösserer Fuscinmengen zwischen den vorderen Antheilen der Stäbchen nehmen durch Lichtentziehung allmählich ab und es stellen sich dann ähnliche Verhältnisse, wie die für das Dunkelauge angegebenen nach etwa 1—2 Stunden her. Dies stimmt so auffällig mit der Zeit, deren die Stäbchen bedürfen um den maximalen Purpurgehalt wieder zu gewinnen, dass der Gedanke nahe liegt, die Veränderungen am Epithel durch Licht mit der Purpurbleichung sowohl, wie mit der darauf folgenden regenerirenden Thätigkeit der Epithelzellen in Verbindung zu bringen. Damit wird allerdings das Richtige höchst wahrscheinlich getroffen, aber es darf deshalb nicht geschlossen werden, dass etwa Bleichung oder Rückkehr des Purpurs immer merklich sein müssten, um die genannten Epithelzustände zu finden.

Um die directe Beziehung des Lichtes zu den Vorgängen im Epithel aller Zweifel zu entheben, ist glücklicher Weise wieder die optographische Methode verwendbar, welche hier zu einer eigenthümlichen Art von Optogrammen führt, die beim Frosche oft unerwünscht leicht erhalten werden. Ist das Licht bei der früher (S. 301) beschriebenen Optographie am Frosche zu intensiv und die Expositionszeit kurz, so kommt die Netzhaut mit den schärfsten negativen, in schwarz und roth ausgeführten Optogrammen zu Tage, die man ohne Weiteres durch Antrocknen im Lichte für lange als schwarzweisse Bilder fixiren kann. Natürlich ist zur Erzielung dieser epithelialen Optogramme Benetzung der Curarefrösche zu vermeiden, damit kein Oedem die Befestigung des Epithels hindere. Man erhält solche Bilder am sichersten in etwa 20 Min., wo eine mit schwarzen Streifen versehene, matte Glastafel zum Objecte diente, auf welches directes Sonnenlicht fiel. [1]

Wenn Frösche bei mittlerer Temperatur auf dem Boden eines Topfes, im gedämpften Lichte geschlossener Räume einigermaassen ruhig sitzen, ist ihre Retina oft nur zu etwa $^3/_4$ epithelfrei und im übrigen Quadranten von dunklem Epithelsammet bedeckt zu erhalten, einer unteren Gegend des Auges entsprechend, mit welcher der

1 Gute Andeutungen epithelialer Optogramme entstehen im Froschauge auch unabsichtlich, denn wenn man Stäbchen- oder Purpuroptogramme mit oder ohne Oedem erzeugt hat, bleiben diese in Folge nachträglichen Verwischens durch Licht oft noch zu negativen verkehrt bestehen, indem die im Leben gebleichten Bänder jetzt vor den übrigen durch zwischen den Stäbchen gebliebene Fuscinreste grau tingirt, zuweilen recht scharf zum Vorschein kommen.

Frosch gegen die hellen Fenster blickte. Unter den Epitheldecken sind die Stäbchen entweder kaum verändert, oder in andern Fällen roth, orange oder dunkel chamois. Die phototrope Epithelreaction beginnt also lange vor vollendeter Bleichung des Purpurs; sie ist vortrefflich bei mässigem, die Stäbchen nicht bleichendem Lichte, am besten entwickelt bei solchem, das die Stäbchenfarbe bis zu hellem Gelb bringt und dort weit ausgeprägter, als an gründlich besonnten Fröschen, wo sie dagegen bald nach begonnener Lichtentziehung das Maximum erreicht. Alle Belichtungen, welche die Regeneration dauernd in Anspruch nehmen und dem Gleichgewichtszustande zwischen Purpurbleiche und Wiederherstellung am günstigsten sind, wirken also am stärksten auf das Epithel. Nichts kann dies schlagender beweisen, als der Effect des rothen Lichtes, welches so mächtige Pigmententleerungen der Basis der Epithelzellen und so massenhaftes und weit nach vorn reichendes Wandern des Fuscins in die Stäbchenzwischenräume hervorruft, dass es den mehrfach erwähnten kräftigsten Lockerungsmitteln fast unmöglich wird, die Stäbchen von der Epitheldecke oder deren Ausläufern zu trennen. Fig. 15 zeigt den Durchschnitt des Sinnesepithels einer so behandelten Netzhaut. Wie zu erwarten ist die Erscheinung zu der Zeit, oder bei solchen Intensitäten der Rothbelichtung, welche den Purpur gerade normal erhalten, am meisten ausgeprägt, während sie, ähnlich wie nach übermässiger Besonnung, bedeutend nachlässt, wenn endlich andauernde Bleichung erzielt ist. Hieraus erklärt sich auch die früher bei der Optographie am Frosche mitgetheilte, anscheinend paradoxe Thatsache, dass Lockerung des Epithels bei belichteten Froschaugen ohne Oedem noch am besten erzielt wird, wenn die Ausbleichung allmählich, nach sehr langer Exposition an mässigem Lichte bewirkt worden: man empfängt den Eindruck, als ob diese Ausbleichung in Wirklichkeit keine so allmähliche sei, sondern in einem späten Stadium mit grösserer Geschwindigkeit zur vollkommenen Entfärbung gehe, wenn das lange regenerativ angestrengte Epithel in dieser seiner Function erlahmt, mit welcher Periode auch der Rückgang der phototropen Fuscinabschichtung zusammenzufallen scheint.

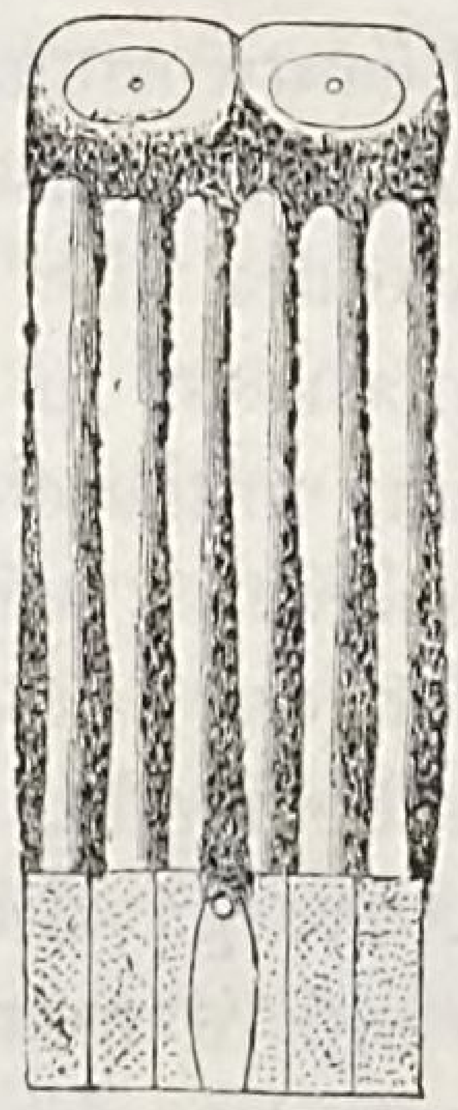


Fig. 15.

Wahrscheinlich kommt die phototrope Epithelreaction allen Wirbelthieren zu. Bei den Vögeln gelingt das Abheben der Netzhaut ohne Epithel fast immer, wenn die Thiere im Dunkeln verweilten, während die Membran aus frischen, belichteten Augen nahezu in ganzer Ausdehnung

dicht vom Pigment bedeckt ausschlüpft. Beim Kaninchen und dem Rinde ist ein stärkeres Haften nach Belichtung unzweifelhaft, wird aber durch Einlegen der frischen Augen in Alaun gehoben. Nur wenn die Augen $^1/_2$—1 Stunde nach dem Tode in den Alaun gekommen, bleibt an der gehärteten Netzhaut Pigment, das sich an Optogrammen vorzugsweise und oft sehr scharf begrenzt auf die belichteten Stellen beschränkt findet. Beim Hunde haftet das gelbliche Tapetalepithel frisch in Alaun gebrachter Augen in der Regel an den hellen Streifen des Optogramms. Für das Auge des Affen, dessen Retina nach keinem Dunkelaufenthalte vom Epithel trennbar gefunden wurde, bildet die Alaunhärtung ebenfalls das Mittel, vollkommen pigmentfreie Präparate zu erzielen. Aus menschlichen, in Eis conservirten Augen im Dunkeln Verstorbener schlüpfte die Retina vorwiegend pigmentfrei ab; in einem Falle, wo ein 2 Stunden im Dunkeln gehaltenes normales Auge, unmittelbar nach der Enucleation am Lebenden, untersucht wurde, war die Netzhaut unter Salzwasser mit grösster Leichtigkeit vollkommen pigmentfrei dem Augengrunde zu entnehmen. Nur die Augen eines im Hellen, mit weit geöffneter Pupille verstorbenen Menschen, lieferten bei fast normalem Purpurgehalte stellenweise stark und fest mit Epithel überzogene Netzhäute; in diesem Falle waren die Augen sofort nach dem Tode ins Dunkle versetzt worden und 24 Stunden in Eis conservirt.

Mussten die bis heute über den Sehpurpur erworbenen Erfahrungen die Frage nach *erregenden*, objectiv in der Netzhaut nachweislichen Wirkungen gänzlich unentschieden lassen, so liegt nun in der phototropen Reaction des Pigmentepithels eine unzweideutige Beantwortung vor, welche dem Lichte einen erkennbar *erregenden* Einfluss auf das Epithelprotoplasma zuschreibt. Unzweifelhaft werden die Fuscinnadeln erst in Folge von Bewegungen des Protoplasmas, in welches sie eingebettet sind, bewegt, und von diesem nur mitgeschleppt oder in seinem Innern umhergetrieben oder abgeschichtet, wie dergleichen in allem contractilen Protoplasma zu sehen ist, das erkennbare Körnchen, Pigmenttheilchen oder leicht zu unterscheidende, von Aussen eingeführte Dinge enthält. Viele solche, dem Auge gänzlich fremde Zellen zeigen ähnliche Reaction auf Licht, besonders wenn sie Pigmente enthalten, welche wie das Fuscin des retinalen Epithels, niedere Grade von Lichtempfindlichkeit besitzen, wofür die contractilen mit dem Lichte veränderlichen Pigmentzellen in der Haut des Frosches ein bekanntes, die des Chamäleon namentlich nach Brücke's[1] Beobachtungen, die mancher Fische und vieler Wirbellosen noch bessere Beispiele liefern. Seit aus Strasburger's[2] Untersuchungen auch auf Licht reagirende Elementarorganismen be-

1 E. Brücke, Wiener Denkschriften 1852.
2 E. Strasburger, Wirkung des Lichtes u. s. w. Jena 1878.

kannt sind, welche keine Farbstoffe enthalten, ist Lichtempfindlichkeit wol auch vom Protoplasma einiger farblosen thierischen Zellen zu erwarten, worüber das albinotische und tapetale Retinaepithel noch weitere Aufschlüsse versprechen. Wie Alles dazu drängt in den Sehzellen auch farblose Sehstoffe anzunehmen und im Sehpurpur nur eine Substanz jener Art zu erblicken, die uns wegen ihrer glücklicherweise farbigen Beschaffenheit zuerst bekannt geworden, so steht der Annahme ähnlicher Stoffe in allem Protoplasma, das auf Licht reagirt, nichts entgegen, in welchem Falle die Hypothese der Sehreger auf alle phototrope animale Reaction zu übertragen ist, die damit zu einem chemischen Reizungsphänomen würde.

Die Bedeutung des retinalen Epithels für das Sehen kann wahrscheinlich nur eine indirecte sein, da dasselbe, wenn vielleicht nicht aller nervösen Verbindung, so doch der Verknüpfung mit der grossen Zahl feinster Opticusausstrahlungen entbehrt, deren ein Stratum echter Sehzellen bedarf. Das mit den Querschnittsmaassen der Stäbchen und Zapfen gut übereinstimmende Unterscheidungsvermögen des menschlichen Auges für kleinste Abstände weist vollends die Auffassung der dazu selbst in der Fovea centralis noch viel zu breiten Epithelzellen als Sehzellen ab. Um so mehr Gewicht wird auf die nachgewiesene, merkwürdige optochemische Beziehung dieser Zellen zu den Stäbchen und auf ihre daraus hervorgehende indirecte Bedeutung für das Sehen zu legen sein. Giebt es ein Sehen mit dem Sehpurpur, so würde es nach dem ersten Gebrauche dahin sein, wenn das Epithel nicht vorhanden oder seine regenerative Function vernichtet wäre. Ausserdem verdient das Epithel in rein optischer Beziehung Beachtung, da es manche Fälle von Irradiation beim Sehen verständlich macht, insofern jede seiner Zellen mehrere Stäbchen aufnimmt, und das durch ein Glied solcher Gruppen gegangene Licht nach der Reflexion an den Rückflächen des Auges auf seinem Rückgange benachbarte Stäbchen mit trifft. In dieser Beziehung könnte das Wandern des Pigmentes auf den Stäbchenkuppen, das dieselben bald enthüllt, bald wieder verdeckt, merkliche Inconstanzen beim Sehen erzeugen.

Sind die Stäbchen und Zapfen durch mechanische Reize erregbar, wie es manche Erscheinungen bei Druckversuchen an unserem Auge wahrscheinlich machen, so ist eine mechanische Reizung der Stäbchenkuppen, sowie der Stäbchen- und Zapfenaussenflächen durch die beweglichen, spitzen Fuscinnadeln, welche dieselben reiben könnten, denkbar, wenn ein irritabler Bestandtheil der Innenglieder in die cuticularen Aussenglieder emporreichen sollte. Freilich würden auf derartigen Erregungen höchstens Lichtempfindungen langsameren Verlaufes

oder Nachempfindungen beruhen können, die, obschon an sich unwesentlich, vielleicht einiges Verständniss des sonderbaren, ausschliesslichen Vorkommens der scharfnadligen Formen des Fuscins in dem Antheile des epithelialen Pigmentbreies versprächen, der mit den Stäbchen in Berührung kommt und nach vorn zu dringen vermag.

VIERTER THEIL.

DER RAUMSINN UND DIE BEWEGUNGEN DES AUGES

VON

PROF. DR. EWALD HERING IN PRAG.

ERSTER ABSCHNITT.

Das Sehen mit unbewegten Augen.

EINLEITUNG.[1]

Wir sehen die Dinge in sehr vielen Fällen in einer anderen Gestalt und an einem anderen Orte, als ihrer wirklichen Gestalt und ihrem wirklichen Orte entspricht.

Der Mond ist für unseren Gesichtsinn eine kleine, flache Scheibe in einer Entfernung, die jedenfalls nicht erheblich über die Entfernung hinausgeht, in welcher uns der fernste noch sichtbare Berg am

1 Bei der ausserordentlichen Menge der Einzelthatsachen, welche die Literatur über die räumlichen Gesichtswahrnehmungen beigebracht hat, war es ganz unmöglich, auf dem zugemessenen Raume irgend erschöpfend zu sein. Ich habe mich also darauf beschränkt, die allgemeinen Sätze, welche sich aus den bisher bekannt gewordenen Thatsachen abstrahiren lassen, an einigen Beispielen zu erörtern. — Noch reicher fast, als in Betreff der Thatsachen, ist die Literatur in Betreff der Theorien. Diese habe ich kurz berührt, insofern sie mir nicht in handgreiflicher Weise durch die angeführten Thatsachen bereits widerlegt schienen. Auf irgendwelche Vollständigkeit in den Angaben über die Literatur habe ich ebenfalls wegen der Ueberfülle verzichtet. Wer weitere Belehrung sucht oder selbst auf diesem Gebiete arbeiten will, findet ausführliche Literaturverzeichnisse im Handbuche der physiologischen Optik von HELMHOLTZ und in AUBERT's Grundzügen der physiologischen Optik (Handb. d. ges. Augenheilk. von GRÄFE u. SAEMISCH II. 2. Th.). In einem Handbuche der Physiologie kann die Lehre von den Sinneswahrnehmungen, welche nur mit einem Fusse in der Physiologie mit dem andern in der Psychologie steht, nicht nach demselben Maassstabe wie die rein physiologischen Capitel bearbeitet werden. Die Psychophysik, deren Hauptinhalt die Lehre von den Sinnen bildet, hat sich bereits zur selbstständigen Disciplin entwickelt.

Horizonte erscheint. Gleichwohl sind wir zu dem Schlusse berechtigt, dass der Mond Kugelgestalt und eine Grösse und Entfernung hat, die seine scheinbare weit übertrifft. Wir *denken* uns also den Mond ganz anders, als wir ihn *sehen*. Den Mond nun, wie wir ihn uns denken, nennen wir den *wirklichen* Mond. Die fernen Bäume einer geraden Allee, die wir durchschreiten, erscheinen uns kleiner und einander näher gerückt, als die gleich grossen Bäume in unserer Nähe. Wir denken uns aber aus guten Gründen jene fernen Bäume ebenso gross und in demselben gegenseitigen Abstande von einander, wie die nahen. Den Raum denken wir uns unendlich, aber wir sehen ihn stets begrenzt durch den Horizont, den Fussboden und das Himmelsgewölbe, oder sonstwie. Unsere Ueberzeugung, dass der Mond viel grösser und ferner ist, als alles Irdische, dass die fernen Bäume so gross sind, wie die nahen, kann uns nicht dazu verhelfen, Mond und Bäume auch entsprechend gross und fern zu *sehen*.

Den Raum, wie er uns in einem gegebenen Augenblicke erscheint, wollen wir den jeweiligen *Sehraum* nennen, und die Dinge, wie wir sie diesen Raum erfüllen oder begrenzen sehen, die *Sehdinge*. Die Form dieser Sehdinge und ihre Anordnung im Sehraume können also, wie obige und zahllose andere Thatsachen lehren, andere sein, als die Form und Anordnung der wirklichen Dinge im wirklichen Raume. Die Sehdinge decken sich nach Gestalt und Ort nicht nothwendig mit den wirklichen Dingen, der Sehraum nicht mit demjenigen Theile des wirklichen Raumes, welcher die, den eben vorhandenen Sehdingen entsprechenden wirklichen Dinge umschliesst.

Da es ein absolutes Maass des Raumes nicht giebt, sondern wir nur eine Raumgrösse mit einer anderen vergleichen und das Verhältniss beider feststellen können, so ist das eben Gesagte dahin zu verstehen, dass die räumlichen *Verhältnisse* der in einem gegebenen Augenblicke vorhandenen Sehdinge andere sind, als die räumlichen Verhältnisse der ihnen entsprechenden wirklichen Dinge.

Diese Unterscheidung zwischen Sehraum und wirklichem Raum, zwischen den Dingen wie sie räumlich sind und den Dingen wie sie uns beim Sehen räumlich erscheinen, muss durchaus gemacht werden, und man muss sich hierüber ganz klar sein, wenn man eine richtige Einsicht in die Gesetze des Sehens gewinnen will. Es handelt sich hierbei nicht um irgendwelche metaphysische Speculation, sondern um einen leicht zu fassenden Fundamentalsatz der Sinnenlehre. In wie weit der Raum und die Dinge, wie wir sie uns auf Grund unserer gesammten sinnlichen Erfahrungen denken und als wirklich bezeichnen, abgesehen von diesem ihrem Vorhandensein in unserem Denken noch eine andere, von diesem Denken unabhängige Existenz haben, ist eine ganz andere Frage, deren Erörterung nicht hierher gehört.

Der Stoff, aus welchem die Sehdinge bestehen, sind die Gesichtsempfindungen. Die untergehende Sonne ist als Sehding eine flache kreisförmige Scheibe, welche aus Gelbroth, also aus einer Gesichtsempfindung besteht. Wir können sie daher geradezu als eine kreisförmige, gelbrothe Empfindung bezeichnen. Diese Empfindung haben wir da, wo uns eben die Sonne erscheint.

Dies ist der einfachste Ausdruck für das Thatsächliche. Man hat sich aber gewöhnt zu sagen, man habe die Empfindung eigentlich im Auge oder im Kopfe, und versetze sie nur in den Aussenraum. Die so in den Aussenraum versetzte Empfindung nennt man demnach auch wohl Vorstellung. Da aber Niemand die Sonne in seinem Auge oder in seinem Kopfe sieht, und wir überhaupt selbst bei geschlossenen Augen jede Gesichtsempfindung vor den Augen und vor dem Kopfe und niemals in denselben haben, so ist offenbar, dass die letzterwähnte Auffassung und Bezeichnungsweise sich nicht blos an das Thatsächliche hält, sondern der Ausfluss weiterer Speculation ist, die wir bei aller Achtung vor derselben zunächst bei Seite zu lassen haben. Dies gilt noch mehr von einer zweiten Auffassung, nach welcher die Empfindung eigentlich formlos ist und erst von uns, z. B. mittels unbewusster Schlüsse, zu räumlichen Vorstellungen verarbeitet wird. Diese sogenannte „reine“ Empfindung wäre hiernach nur ein form- und raumloses Etwas, auf dessen Grundlage erst die Vorstellung als Anschauung sich bildet.

Da wir aber Gesichtsempfindungen, die weder Form noch Ort noch Ausdehnung, also überhaupt keinerlei räumliche Eigenschaft hätten, gar nicht kennen, solche Empfindungen also für uns ebenfalls nur ein Ergebniss der Speculation sind, so müssen wir auch diese Ansicht so lange unberücksichtigt lassen, als es sich nur um die Schilderung der Thatsachen handelt. Weiss, Schwarz, Blau u. s. w. nennen wir Empfindungen, diese Empfindungen haben immer räumliche Eigenschaften, eine mehr oder minder bestimmte Form oder zum Mindesten eine Ausdehnung, auch haben sie immer irgend welchen Ort und zwar diesen stets ausserhalb unserer Augen. Wenn nun eine weisse Empfindung von quadratischer Form vor uns ist, so sagen wir, dass wir ein weisses Quadrat sehen. Umgekehrt können wir also auch sagen, dass dieses weisse Quadrat, so wie wir es sehen, d. h. als Sehding, eine weisse quadratisch geformte Empfindung ist, die vor uns im Sehraum liegt. Es bleibt Jedem unbenommen, sich dies in die Sprache seiner theoretischen Ansichten über die Natur, Entstehung und Entwicklung der räumlichen Gesichtswahrnehmung zu übersetzen.

Diejenige verticale Ebene im Raume, welche unsern Körper bei zwangloser aufrechter Haltung, d. i. bei seiner Primärstellung[1] in symmetrische Hälften theilt, nennen wir die Medianebene des wirklichen Raumes.

Eine zweite verticale Ebene geht durch die Drehpunkte beider Augen; sie schneidet die Medianebene rechtwinklig und heisse die Frontalebene des wirklichen Raumes.

Die durch die Drehpunkte beider Augen gelegte Horizontalebene endlich heisse die horizontale Hauptebene des wirklichen Raumes.

Durch diese drei Ebenen ist ein medianer, ein frontaler und ein horizontaler ebener Durchschnitt des Kopfes gegeben. Wenn nun der Kopf seine Stellung ändert, während wir mit den Füssen noch auf der alten Stelle stehen, so fallen die Ebenen dieser Durchschnitte nicht mehr mit den oben genannten Hauptebenen des Raumes zusammen. Wir nennen die Ebene des medianen Kopfschnittes die Medianebene des Kopfes, die des frontalen Schnittes die Frontalebene des Kopfes, die des horizontalen Schnittes die primäre Blickebene. Diese drei Ebenen sind also mit dem Kopfe fest verbunden und mit ihm beweglich zu denken; nur wenn der Kopf wieder in die oben angenommene aufrechte und gerade Stellung zurückkehrt, fallen diese drei Ebenen des Kopfes wieder mit den drei Hauptebenen des Raumes zusammen.

Je nachdem wir nun das eine oder das andere zweckmässiger finden, werden wir die Lage eines Aussendinges in Bezug auf die drei Hauptebenen des Raumes oder aber in Bezug auf die drei Schnittebenen des Kopfes bestimmen.

Von den drei wirklichen Hauptebenen des Raumes haben wir die scheinbaren zu unterscheiden. Wir haben auch bei geschlossenen Augen oder im Finstern immer eine Vorstellung von unserem Körper und diese ist bei gerader, aufrechter Stellung besonders genau. Folglich haben wir in diesem Falle auch eine ziemlich zutreffende Vorstellung von der Lage der drei durch ihn bestimmten Hauptebenen des Raumes. Die vorgestellte Medianebene nennen wir seine vermeintliche oder scheinbare Medianebene, und ebenso unterscheiden wir die scheinbare horizontale Hauptebene und die scheinbare Frontalebene des Raumes. Ist unsere Vorstellung von der Stellung unseres Körpers ungenau, so wird auch die scheinbare Lage einer oder sämmtlicher genannter Hauptebenen eine falsche sein.

1 Eine genauere Bestimmung dieser Primärstellung wird im Capitel über die Augenbewegungen gegeben.

Wir werden im Folgenden meist eine gerade aufrechte Stellung des Körpers und Kopfes annehmen. Könnten wir dies ganz ausschliesslich thun, so hätten wir nicht nöthig, die drei Schnittebenen des Kopfes von den drei Hauptebenen des Raumes zu unterscheiden, denn dieselben würden dann immer zusammenfallen. Wir werden ferner annehmen, das Vorstellungsbild, welches wir auf Grund zahlreicher gegenwärtiger Empfindungen und unter Mithilfe ergänzender Erinnerungsbilder von unserem Körper haben, decke bei Primärstellung desselben unter gewöhnlichen Umständen den wirklichen Körper, so dass die drei scheinbaren Hauptebenen des Raumes mit seinen wirklichen zusammenfallen.

Denjenigen Theil des wirklichen Raumes, dessen Inhalt bei einer gegebenen Augenstellung beiden Augen zugleich sichtbar ist, nennen wir den binocularen Gesichtsraum zum Unterschiede vom Gesichtsraume des linken oder rechten Auges. Der binoculare Gesichtsraum ist der, beiden unocularen Gesichtsräumen gemeinsame Theil des Aussenraumes. Wir unterscheiden also streng zwischen dem jeweiligen Gesichtsraum, welcher die eben gesehenen Dinge, und dem jeweiligen Sehraume, welcher die entsprechenden Sehdinge enthält.

Es wird später erörtert werden, dass wir bei Primärstellung des Kopfes und symmetrischer Convergenz der Gesichtslinien einen Aussenpunkt, der sich auf beiden Netzhäuten an den Stellen des directen Sehens abbildet, in der scheinbaren Medianebene sehen und zwar mit solcher Bestimmtheit, dass wir, wenn dabei zugleich viele andere Punkte sichtbar sind, über die Wahl des in der Medianebene erscheinenden nur innerhalb eines sehr kleinen Sehraumbezirkes zweifelhaft sind. Daraus folgt aber nicht, dass in allen Fällen ein Aussenpunkt der uns in der Medianebene zu liegen scheint, auch in der wirklichen Medianebene liegt. Denn erstens können wir uns über die Stellung unseres Körpers oder Kopfes täuschen, welchenfalls die wirkliche Medianebene nicht mit der scheinbaren zusammenfallen würde. Zweitens könnten unsere Gesichtslinien wider unseren Willen unsymmetrisch convergiren, während wir geradaus zu sehen vermeinen. Drittens könnte der Gang der Lichtstrahlen, welche von dem fraglichen Aussenpunkte ausgehen, ein ungewöhnlicher sein, weil wir z. B. Prismen vor beiden Augen hätten. In allen diesen Fällen würde sich ein nicht median gelegener Aussenpunkt auf den Stellen des directen Sehens abbilden können, und wir würden denselben mit grosser Bestimmtheit in der Medianebene sehen, auch wenn wir wüssten, dass er nicht da liegt.

Wir müssen deshalb streng unterscheiden zwischen der Bestimmtheit der Lage eines Sehdinges und der mehr oder minder grossen Uebereinstimmung dieser Lage mit der des entsprechenden wirklichen Dinges im wirklichen Raume. Hat ein Sehding zu den drei scheinbaren Hauptebenen des Raumes dasselbe Lagenverhältniss, wie das entsprechende wirkliche Ding zu den wirklichen Hauptebenen, und fallen erstere und letztere zusammen, so sagen wir, dass der Sehort des Dinges oder seine Lokalisirung richtig ist. Die Lokalisirung eines Sehdinges kann aber sehr bestimmt und doch falsch sein. Wie nöthig es ist, diese strenge Unterscheidung zwischen der Bestimmtheit und der Richtigkeit der Lokalisirung zu machen, geht aus Folgendem hervor.

Um unsere Bewegungen in Uebereinstimmung zu setzen mit den räumlichen Gesichtswahrnehmungen und z. B. mit Sicherheit nach einem gegebenen Ziele zu werfen, ist nothwendig, dass erstens der scheinbare Ort des Zieles in gesetzmässiger Weise von seinem wirklichen Orte abhänge, und dass zweitens die Wurfbewegung der Hand wieder in gesetzmässiger und zweckentsprechender Weise von dem scheinbaren Orte des Dinges abhänge. Dass der scheinbare Ort dem wirklichen entspreche, ist dabei nicht nöthig. Denn angenommen, man sähe das Wurfziel, ähnlich wie den Mond, viel zu nahe, so würden wir dasselbe doch treffen, wenn wir gelernt hätten, bei einer bestimmt gegebenen scheinbaren Entfernung des Zieles dem Wurfgeschoss denjenigen Stoss zu ertheilen, welcher es bis zum wirklichen Orte des Zieles treibt. Hierzu bedarf es also, wenn anders die Bedingungen des Sehens die gewöhnlichen und normalen sind, nur der Bestimmtheit nicht auch der Richtigkeit des scheinbaren Ortes.

Um den Ort eines kurz zuvor gesehenen Dinges nachträglich mit den Fingern richtig anzugeben, oder einen gesehenen Gegenstand sicher mit der Hand zu ergreifen, auch wenn die Hand während der Bewegung selbst nicht gesehen wird, ist ebenfalls eine richtige, der Wirklichkeit entsprechende Lokalisirung gar nicht nöthig, sondern nur erforderlich, dass dieselbe hinreichend bestimmt sei, damit durch sie als Zwischenglied eine gesetzmässige Beziehung zwischen dem wirklichen Orte des gesehenen Dinges und der Bewegung der Hand gegeben werde. —

Unser Sehorgan besteht aus den beiden Augen, den Sehnerven und denjenigen Hirntheilen, welche am Zustandekommen der in das Bereich des Gesichtssinnes gehörenden Empfindungen, Wahrnehmungen und Vorstellungen mit betheiligt sind. Wir nennen dies gesammte Organ das Doppelauge.

Da wir normaler Weise mit beiden Augen zugleich sehen, so haben wir von dem doppeläugigen Sehen auszugehen, und das einäugige Sehen nur in zweiter Linie zu berücksichtigen. Wir werden uns im ersten Abschnitte unserer Betrachtung die Augen unbewegt denken, im zweiten aber das Sehen mit wanderndem Blicke erörtern.

ERSTES CAPITEL.

Die Correspondenz der Netzhäute.

Das Lageverhältniss eines Aussenpunktes zu den beiden Netzhäuten des Doppelauges bestimmen wir mittels der Richtungslinien, deren jede einen Aussenpunkt mit seinem Bildpunkte auf der Netzhaut verbindet. Wir nehmen an, dass sämmtliche Richtungslinien sich in einem Punkte kreuzen, welcher seine Lage im Auge nie ändert. Sämmtliche Richtungslinien einer Netzhaut bilden ein Strahlbüschel, das mit dem Auge fest verbunden und mit ihm beweglich ist. Jedem bestimmten Strahle dieses Büschels entspricht ein bestimmter Netzhautpunkt und umgekehrt. Jedem bestimmten Aussenpunkte, welcher beiden Augen zugleich sichtbar ist, entsprechen zwei Richtungslinien, deren Lage in jedem Strahlbüschel und Auge von der jeweiligen Stellung des letzteren abhängt.

Gleichgültig ist hierbei vorerst, wie wir uns die Netzhaut gestaltet denken, und wir werden deshalb im Folgenden der Einfachheit wegen meist annehmen, jede Netzhaut sei eine sphärisch gekrümmte Fläche, deren Mittelpunkt im Kreuzungspunkte der Richtungslinien liegt, oder eine im hinteren Endpunkte der Gesichtslinie senkrecht zur letzteren stehende Ebene, auf die wir uns sämmtliche Punkte der wirklichen Netzhaut mittels der Richtungslinien projicirt denken.

Wir wollen ferner annehmen, dass der Kreuzungspunkt der Richtungslinien trotz der Accommodation eine unveränderliche Lage im Auge haben.

Ein ausgezeichneter Strahl jedes der beiden Strahlbüschel ist die Gesichtslinie (Helmholtz) als die der Stelle des schärfsten oder directen Sehens entsprechende Richtungslinie. Einen Punkt einäugig oder doppeläugig fixiren heisst die Gesichtslinie eines oder jedes

Auges so stellen, dass sie durch den fixirten Punkt geht. Beide Gesichtslinien schneiden sich beim gewöhnlichen Sehen stets; ihre Ebene heisse die Blickebene und ihr Durchschnittspunkt der Blickpunkt. Derselbe wird auch als Fixationspunkt bezeichnet; wir wollen jedoch mit diesem Worte den Punkt benennen, in welchem eine Gesichtslinie ein Aussending schneidet. Wenn wir z. B. auf das Papier sehen, während die Gesichtslinien parallel liegen, so schneidet die linke Gesichtslinie das Papier in einem andern Punkte, als die rechte und wir haben also einen linksäugigen und einen rechtsäugigen Fixationspunkt zu unterscheiden. Der Blickpunkt liegt dabei in grosser Ferne hinter dem Papier, oder es giebt, falls die Gesichtslinien nicht genau in einer Ebene liegen, gar keinen Blickpunkt. Für gewöhnlich fallen allerdings beide Fixationspunkte mit dem Blickpunkte zusammen.

Der Winkel, welchen bei feststehendem Auge zwei Richtungslinien einschliessen, die den beiden Endpunkten einer gegebenen Strecke im Aussenraume entsprechen, heisst der Gesichtswinkel der Strecke.

Streng genommen müsste man entweder die im vorderen Knotenpunkte sich kreuzenden vorderen Richtungslinien, in vielen Fällen noch besser die Visirlinien zur Bestimmung des Gesichtswinkels benützen. Von allen diesen Winkeln wäre noch der Gesichtswinkel bei bewegtem Auge zu unterscheiden, d. i. der Winkel, welchen die beiden Lagen der Gesichtslinie bei abwechselnder Fixirung des einen und anderen Endpunktes der Strecke einschliessen. Seine Spitze liegt im Drehpunkte des Auges, insoweit wir den Abstand dieses Punktes von der Gesichtslinie vernachlässigen dürfen.[1]

Die Annahme, dass sich sämmtliche Richtungslinien in einem Punkte schneiden, der seinen Ort im Auge nicht ändert, ist selbstverständlich ungenau, aber sie ist uns als die für die Darstellung weitaus bequemste erschienen. Handelte es sich nur um das Sehen isolirter Punkte oder Linien, nicht um das Sehen von Grenzlinien verschieden heller und verschieden farbiger Flächen, so würde man besser die Visirlinien statt der Gesichtslinien benützen und mit Helmholtz annehmen, dass das Centrum der Visirlinien eine unveränderliche Lage im Auge hat, so wie ferner annehmen, dass die zu einem bestimmten Netzhautpunkte gehörige Visirlinie bei der Accommodation ihre Lage im Auge nicht ändert. Die Netzhautbildfläche könnte man sich dann als die vordere oder hintere Hälfte einer um das Centrum der Visirlinien als Mittelpunkt gelegten Kugelfläche denken; denn es kommt ja auch hier nur darauf an, dass ein bestimmter Netzhautpunkt einer bestimmten Linie des Visirlinienbüschels zugehöre und umgekehrt.

1 Vgl. Helmholtz, Physiol. Optik S. 99.

I. Das Schema der Correspondenz.

Wenn wir einen bestimmten Stern am Himmel fixiren, so scheinen uns sämmtliche Sterne an einer je nach den Umständen ebenen oder irgendwie gekrümmten Fläche zu liegen, welche die Grenze unseres Sehraumes bildet. Stehen wir vor einer weissen weit ausgedehnten vertikalen Wand und fixiren eine Stelle derselben, so sehen wir entsprechend eine weisse Ebene als Grenzfläche des Sehraumes. Eine solche bei unbewegten Augen erscheinende Sehfläche, vor welcher nichts Anderes sichtbar ist, und welche den Sehraum begrenzt, heisst ein Sehfeld des unbewegten Doppelauges.

Schliessen wir während der Fixirung eines bestimmten Sternes ein Auge, so erscheinen uns die Sterne nach wie vor an denselben Orten im Sehfelde. Verdecken wir bei binocularem Sehen dem einen Auge durch einen nahe vorgehaltenen Schirm die eine Hälfte des Himmels bis zum fixirten Sterne, dem andern die andere Hälfte, so setzen sich die beiden einäugig gesehenen Hälften zu einem Ganzen zusammen, in welchem die Sterne dieselbe scheinbare Lage haben wie zuvor.

Es ist also, wenn der Blickpunkt in grosser Ferne liegt, und die Gesichtslinien parallel sind, für die scheinbare Lage der sichtbaren sehr fernen Dinge, insoweit der hier beschriebene Versuch dies zu beurtheilen gestattet, gleichgültig, ob die Dinge sich zugleich in beiden oder nur in einem, oder endlich ob sie sich zum Theil im einen, zum Theil im andern Auge abbilden, vorausgesetzt, dass dabei das Sehfeld seine Form und Lage nicht ändert, und die scheinbare Ferne der Dinge dieselbe bleibt, wie dies beim Versuche am Himmelsgewölbe der Fall ist.

Verschieben wir dagegen während der Betrachtung des Sternhimmels das eine Auge durch Fingerdruck etwas nach oben oder unten, schieben wir schnell vor das eine Auge ein Prisma oder schielen wir einwärts, so dass die Gesichtslinien nicht mehr parallel liegen; dann erscheinen alle Sterne doppelt. Verdecken wir dem durch Fingerdruck verschobenen Auge die eine Hälfte des Himmels, dem andern die andere, so haben die beiden einäugig gesehenen Hälften eine veränderte Lage zu einander und erscheinen gegen einander verschoben.

Die Bilder des Sternhimmels müssen also bei binocularer Betrachtung auf beiden Netzhäuten eine ganz bestimmte Lage haben, wenn durch vollständiges oder partielles Verdecken eines Auges in der räumlichen Erscheinungsweise der Sterne keine Aenderung ein-

treten soll. Diese Lage der Bilder auf beiden Netzhäuten nennt man die correspondirende Lage, und die Stellen beider Netzhäute, auf welchen hierbei das Bild eines und desselben Sternes liegt, heissen correspondirende Stellen oder Deckstellen.

Jedes Paar solcher Deckstellen ist also dadurch charakterisirt, dass beiden in einem gegebenen Sehfelde wie z. B. dem scheinbaren Himmelsgewölbe ein und derselbe Ort entspricht, an welchem die von ihnen ausgelöste Empfindung erscheint, und zwar gleichviel, ob diese Empfindung von beiden Stellen zugleich oder nur von einer derselben ausgelöst wurde. Daher kann die eine Stelle durch die andere vertreten werden, ohne dass dadurch am scheinbaren Orte der zugehörigen Empfindung im gegebenen Sehfelde etwas geändert wird.

Wenn man beide als Halbkugelflächen oder Ebenen gedachten Netzhäute so zusammen legen würde, dass die beiden congruenten Bilder des Sternhimmels sich dabei deckten, so würden auch alle correspondirenden Punkte beider Netzhäute sich decken, und die beiden Richtungslinien jedes Paares, welche wir als correspondirende Richtungslinien bezeichnen können, zusammenfallen. Da die Stellen des directen Sehens, welche wir die physiologischen Netzhautcentren nennen wollen, nicht mit den geometrischen Mittelpunkten der Netzhäute zusammenfallen, sich vielmehr jede Netzhaut von jenen Centren nasenwärts weiter erstreckt als schläfenwärts, so versteht sich, dass bei dem gedachten Zusammenliegen der hemisphärischen Netzhäute sich dieselben nur mit ihrem grösseren Theile decken könnten, und dass dieser gemeinsame Theil jederseits durch die nasenwärts gelegene Partie jeder Einzelnetzhaut überragt würde. Der Mitteltheil eines gegebenen Sehfeldes, in welchem die auf den correspondirenden Abschnitten beider Netzhäute abgebildeten Dinge erscheinen, ist der binoculare, die nach rechts und links anstossenden Theile sind die unocularen Abschnitte des Sehfeldes.

Um die Lage eines Punktes der Netzhaut zu bestimmen, legen wir bei Primärstellung des Kopfes durch die beiden horizontal und parallel geradeaus gestellten, d. i. in ihrer Primärstellung befindlichen Gesichtslinien eine Ebene, die Blickebene, und bezeichnen die Linie, in welcher jede Netzhaut von dieser Ebene geschnitten wird, als mittlen Querschnitt der Netzhaut (horizontale Trennungslinie nach RUETE, Netzhauthorizont nach HELMHOLTZ). Ferner denken wir uns durch jede Gesichtslinie eine zur Blickebene senkrechte Ebene gelegt, und nennen die Linie, in welcher diese Ebene die Netzhaut durchschneidet, den mittlen Längsschnitt (ver-

ticale Trennungslinie nach RUETE, scheinbar verticaler Meridian nach HELMHOLTZ). Mittler Querschnitt und mittler Längsschnitt der Netzhaut kreuzen sich also im Centrum der Netzhaut.

Legen wir ferner in die Verbindungslinie der beiden Kreuzungspunkte der Richtungslinien alle möglichen zur Blickebene geneigten Ebenen, so wird jede Netzhaut von jeder solchen Ebene in einer Linie durchschnitten, welche wir einen Querschnitt der Netzhaut nennen wollen. Legen wir ebenso durch die im Kreuzungspunkte der Richtungslinien senkrecht zur horizontalen primären Blickebene stehende Gerade alle möglichen Ebenen, so schneidet jede derselben die Netzhaut in einer Linie, welche ein Längsschnitt heisse. Jeder Querschnitt oder Längsschnitt einer Netzhaut ist bestimmt durch die Grösse und das Vorzeichen des Winkels, welchen seine Ebene mit der Ebene des mittlen Querschnittes oder Längsschnittes einschliesst, und je zwei Quer- oder Längsschnitte, deren Ebenen um gleiche positive, beziehungsweise negative Winkel von der Ebene des mittlen Quer- oder Längsschnittes abweichen, sind correspondirende Netzhautschnitte. Jeder Netzhautpunkt ist bestimmt, wenn wir den Querschnitt und den Längsschnitt kennen, welchem er angehört; und je zwei Punkte beider Netzhäute, welche correspondirenden Längs- und Querschnitten angehören, sind correspondirende Punkte. Rechts und oben sind positiv.

Die Abweichung eines Netzhautpunktes vom mittlen Querschnitte heisst seine (positive oder negative) Längsabweichung oder Höhe, und wir messen dieselbe durch den Winkel, welchen die Ebene des Querschnittes, dem der Punkt angehört, mit der Ebene des mittlen Querschnittes einschliesst. Entsprechend messen wir die (positive oder negative) quere Abweichung oder Breite eines Netzhautpunktes durch den Winkel, welchen die Ebene des Längsschnittes, dem der Punkt angehört, mit der Ebene des mittlen Längsschnittes macht. Deckpunkte sind also solche, welche auf beiden Netzhäuten gleiche Breite und Höhe haben.

Um die Beziehung eines bestimmten Deckpunktpaares zu der Stelle des Sehfeldes ausdrücken zu können, in welcher eine von ihm ausgelöste Empfindung erscheint, nennen wir Längsmittellinie des Sehfeldes die Linie, auf welcher sämmtliche von den Längsschnitten der Netzhäute ausgelösten Empfindungen gesehen werden, und quere Mittellinie des Sehfeldes die Linie, welche den scheinbaren Ort aller Aussenpunkte enthält, die sich auf den mittlen Querschnitten der Netzhäute abbilden. Im Kreuzungspunkte der queren und der Längsmittellinie erscheint also die den Netzhautcentren entsprechende Empfindung, er ist der scheinbare Ort des fixirten Aussen-

punktes. Setzen wir den einfachsten Fall, dass das Sehfeld eine Ebene ist, so können wir wieder den Abstand eines beliebigen Punktes im Sehfelde von der queren Mittellinie desselben den (positiven oder negativen) Längsabstand oder die Höhe, den Abstand von der Längsmittellinie des Sehfeldes den queren Abstand oder die Breite des Punktes nennen.

Da nun, wie wir gesehen haben, jedem Deckpunktpaare nur ein Punkt im Sehfelde entspricht, so können wir jede zwei Deckpunkte dadurch charakterisirt denken, dass die von ihnen ausgelöste Empfindung eine und dieselbe Höhe und Breite im gegebenen Sehfelde hat, gleichviel, ob sie durch gleichzeitige Reizung beider oder nur eines der Deckpunkte ausgelöst wurde.

Correspondirend gelegene Netzhautpunkte haben also in Beziehung auf ein gegebenes Sehfeld einen und denselben oder identischen Höhen- und Breitenwerth. Die ältere Bezeichnung der Deckstellen als identischer Stellen erscheint deshalb angemessen, wenn es sich nur um den ihnen entsprechenden Ort in einem gegebenen Sehfelde handelt; im Uebrigen ist sie unzutreffend, weil es, wie wir später sehen werden, für die scheinbare Ferne der Dinge nicht gleichgültig ist, ob sie sich auf einem Punkte der rechten oder auf dem correspondirenden Punkte der linken Netzhaut abbilden.

Zwei Punkte auf beiden Netzhäuten, welche nicht Deckpunkte sind, heissen disparate Punkte (Fechner), zwei verschiedene Punkte einer und derselben Netzhaut differente Punkte (Fechner).

Ein Punktpaar, welches correspondirenden Querschnitten aber disparaten Längsschnitten angehört, heisse ein querdisparates Punktpaar; eines, das auf correspondirenden Längsschnitten aber disparaten Querschnitten liegt, ein längsdisparates; ein sowohl auf disparaten Quer- als auch Längsschnitten liegendes heisse ein schräg disparates Punktpaar.

Die Differenz des Breitenwerthes der beiden disparaten Längsschnitte, welchem ein Punktpaar angehört, ist das Maass der queren Disparation, die Differenz des Höhenwerthes der beiden disparaten Querschnitte, auf welchen das Punktpaar liegt, das Maass der Längsdisparation.

Diese Art der Eintheilung der Netzhäute, welche eine physiologisch begründete und für die meisten weiteren Untersuchungen allein zweckmässige ist, wurde von Hering [1] eingeführt. Ueber die ältere Eintheilung s. u.

[1] Hering, Beiträge zur Physiologie I. § 6. 1861 und III. § 77. 1863.

Aus dem Gesagten folgt übrigens noch nicht, dass zwei Empfindungen, welche von differenten Punkten desselben Längs- (oder Quer-) schnittes, oder von disparaten Punkten eines correspondirenden Längsschnitt- (oder Querschnitt-) Paares ausgelöst werden, im ebenen Sehfelde auch denselben Breiten- (oder Höhen-) Werth haben, und von der mittlen Längs- (oder Quer-) linie des Sehfeldes gleichweit abliegen müssen. In wie weit gleichen Breiten- oder Höhenwerthen verschiedener Netzhautpunkte gleiche Breiten- oder Höhenwerthe der zugehörigen Empfindungen im Sehfelde entsprechen, wird im nächsten Capitel erörtert.

Die ältere aber nur in besonderen Fällen verwendbare Eintheilung der Netzhaut ist folgende: Die Stelle des directen Sehens wird als Pol der hemisphärisch gedachten Netzhaut angesehen; um diesen Pol denkt man sich auf der Kugelfläche ein System von Parallelkreisen gelegt. Jede durch die Gesichtslinie gelegte Ebene schneidet die Netzhaut in einem sogenannten Meridiane derselben. Der dem mittlen Querschnitt entsprechende Meridian heisst der scheinbar horizontale, der dem mittlen Längsschnitt entsprechende der scheinbar verticale Meridian. Ein Netzhautpunkt ist bestimmt, wenn man den Meridian und den Parallelkreis kennt, welchem er angehört.

II. Genauere Bestimmung der Deckpunkte.

Die oben erwähnte Thatsache, dass wir beim Fixiren eines Sternes dem linken Netzhautbilde des Sternhimmels das correspondirende Bild im rechten Auge ganz oder theilweise substituiren können und umgekehrt, ohne dass dadurch die scheinbare Anordnung der Sterne im Sehfelde sich merklich ändert, eröffnet uns den Weg zur genaueren Untersuchung der Lage der Deckpunkte auf den Netzhäuten. Wir suchen also festzustellen, in wie weit für je einen bestimmten Punkt der einen Netzhaut ein bestimmter Punkt der andern eintreten kann, ohne dass dadurch der Ort der zugehörigen Empfindung im gegebenen Sehfelde geändert wird. Diese zuerst von v. Recklinghausen[1] für Convergenzstellungen benützte und von Hering[2] zum Zwecke der allgemeinen Untersuchung der Deckstellen entwickelte Methode heisse die Methode der gegenseitigen Substitution der Netzhautstellen.

Denken wir uns die Gesichtslinien bei Primärstellung des Kopfes horizontal geradeaus, also zugleich parallel gestellt, als ob wir einen

1 v. Recklinghausen, Arch. f. Ophthalmologie V. 2. Abth. S. 127. 1859.
2 Hering, Beiträge zur Physiologie III. § 73. 1863.

fernen Punkt betrachteten, der in gleicher Höhe wie unsere Augen über dem Horizonte liegt. In einer dem Fernpunkte der etwas kurzsichtigen oder kurzsichtig gemachten[1] Augen befinde sich ein verticaler weisser Schirm, welcher von den parallelen Gesichtslinien senkrecht durchschnitten wird. Die beiden Schnittpunkte seien auf der weissen Fläche durch zwei ganz gleiche kleine Marken sichtbar gemacht, oder es sei um jeden derselben ein kleiner Kreis gezogen (Fig. 1).

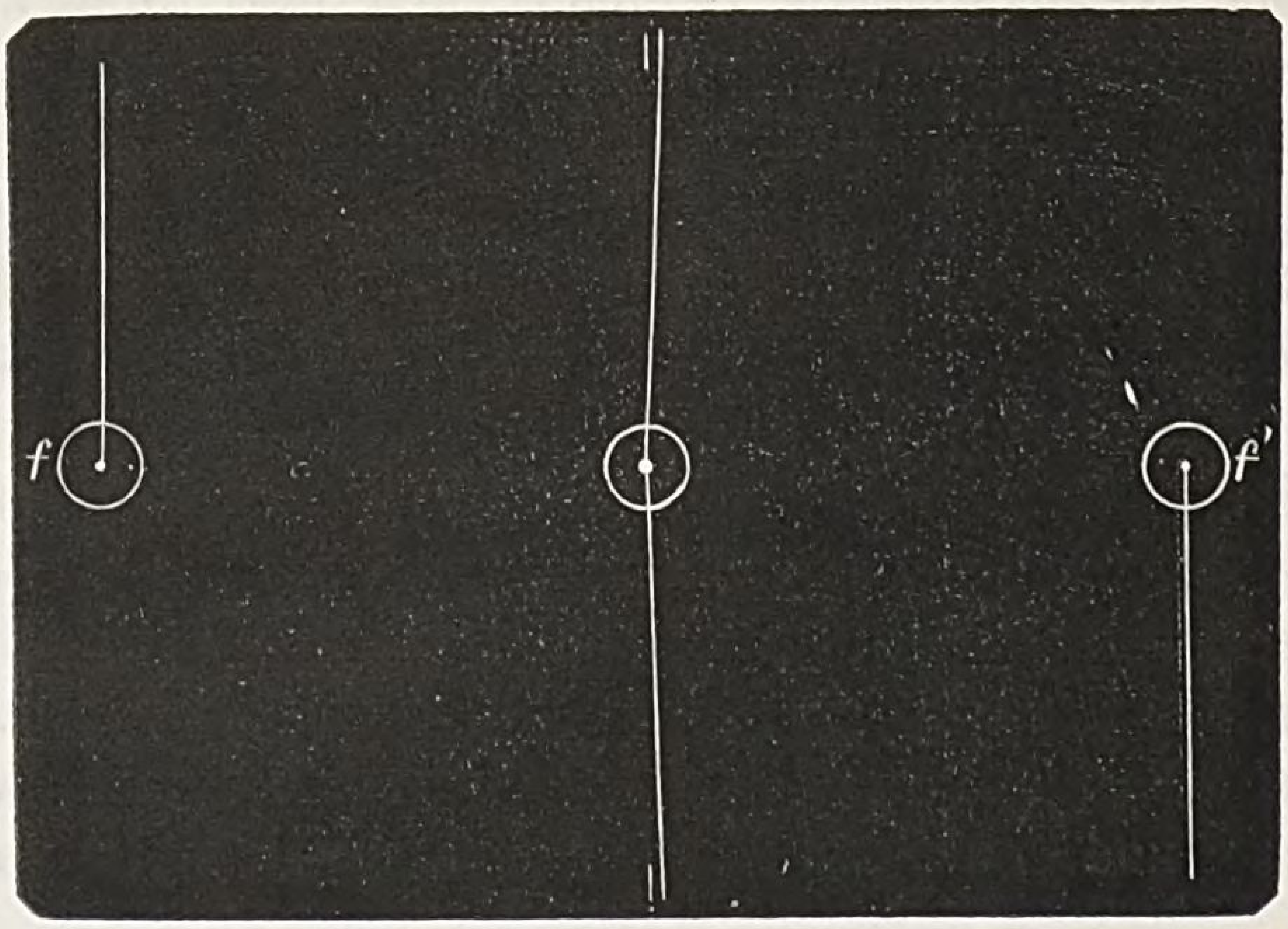


Fig. 1.

Befindet sich zwischen den Augen in der Medianebene ein bis nahe an den weissen Schirm reichender schwarzer Schirm oder blickt jedes Auge durch eine cylindrische Röhre, deren Axe mit der Gesichtslinie zusammenfällt, so ist dem linken Auge nur die linke dem rechten nur die rechte Marke sichtbar; die Bilder derselben aber decken sich und man sieht nur eine Marke in der Längsmittellinie des ebenen verticalen Sehfeldes. Zieht man ferner auf dem Schirme durch den linken Fixationspunkt eine senkrechte schwarze Linie, so erscheint dieselbe als eine durch die Mitte des Sehfeldes gehende annähernd verticale Linie, obwohl sie nur vom linken Auge gesehen wird. Da aber unserer Voraussetzung nach zwei correspondirende Netzhautstellen einer und derselben Stelle im gegebenen Sehfelde entsprechen, so muss es gleichgültig sein, ob wir dem linken Auge die ganze Linie sichtbar machen oder ihm nur die obere Hälfte, den correspondirenden Stellen des rechten Auges aber die untere Hälfte darbieten. Zeichnen wir also die beiden Linienhälften so auf den

1 Bei Anwendung von Linsen muss man sehr sorgfältig darauf achten, dass nicht durch schiefe Stellung der Linse eine Verzerrung des Netzhautbildes herbeigeführt werde. Besser ist es immer, wenn man ohne Gläser untersuchen kann.

Schirm wie es Fig. 1 darstellt, so muss uns wieder eine durch die Marke in der Mitte des Schirmes verlaufende gerade Linie erscheinen, falls sich jetzt die nur vom rechten Auge gesehene untere Linienhälfte auf Deckpunkten derjenigen Netzhautpunkte des linken Auges abbildet, welche anfangs das Bild der unteren Linienhälfte trugen. Dies ist nun aber meistens nicht der Fall, und deshalb erscheint die Linie in der Mitte geknickt, und es bilden ihre beiden Hälften einen nach rechts offenen sehr stumpfen Winkel, wie in der Mitte der Fig. 1 dargestellt ist. Bieten wir umgekehrt dem rechten Auge die obere, dem linken die untere Halblinie, so erscheint der Winkel gleichgross, aber nach links offen.

Um die Linie ungebrochen zu sehen, müssen wir entweder die vom linken Auge gesehene obere Halblinie mit ihrem oberen Ende oder die rechtsäugig gesehene untere Halblinie mit ihrem unteren Ende um einen bestimmten kleinen Winkel nach links hin neigen. Ersteren Falls erscheint uns aber die nun ungebrochene Linie mit dem oberen Ende etwas nach links, letzterenfalls etwas nach rechts geneigt. Soll die Linie ungebrochen und zugleich in der Medianebene erscheinen, so müssen wir die erwähnte Neigung auf beide Halblinien zu gleichen Hälften vertheilen. Die dann für jede Halblinie nöthige Neigung ist individuell verschieden und schwankt nach den bisherigen Angaben zwischen 0^0 und etwa $1^0\ 30'$.

Um die Neigung der Halblinien leicht und messbar ausführen zu können, benützt man entweder statt der Linien zwei schwarze Fäden, die je in einem Fixationspunkt befestigt und mit dem andern Ende über einer Kreistheilung beweglich sind, oder man theilt nach dem Vorgange VOLKMANN's[1] den Schirm in eine rechte und linke Hälfte, giebt jeder Hälfte die Form einer Kreisscheibe, welche um den Punkt f beziehentlich f' als den Mittelpunkt drehbar ist, versieht die Peripherie jeder Kreisscheibe mit einer Kreistheilung und liest an einem Index die Grösse der nöthigen Drehung ab.

Die richtige Lage der Gesichtslinien zum Schirme controlirt man dadurch, dass man in f und f' feine zur Schirmfläche senkrechte Nadeln anbringt, welche beiderseits in totaler Verkürzung und also punktförmig erscheinen müssen.[2] Eine derartige Vorrichtung, mittels welcher jedem Auge ein besonderes Gesichtsfeld dargeboten, der Inhalt beider Gesichtsfelder aber vereint im Sehfelde zur Erscheinung gebracht wird, heisse eine haploskopische Vorrichtung.

1 VOLKMANN, Physiol. Untersuchungen II. 1864.

2 Ueber andere Mittel zur Controle der Stellung der Gesichtslinie in Bezug auf den Schirm vgl. den Abschnitt über die Augenbewegungen.

Die Gesammtheit der Richtungslinien, welche den einzelnen Punkten einer durch den Fixationspunkt (*f* oder *f'*) gehenden Verticallinie entsprechen, bilden eine senkrechte Ebene, welche die Netzhaut in ihrem verticalen Meridiane durchschneidet, und auf diesem Meridiane liegt zugleich das Bild der Linie.

Aus dem Versuche geht also hervor, dass die bei horizontal und parallel geradaus gestellten Gesichtslinien vertical liegenden Netzhautmeridiane nicht genau correspondiren, dass dagegen ein mit dem oberen Ende etwas nach links geneigter Netzhautmeridian des linken Auges einem mit dem oberen Ende um denselben Winkel nach rechts geneigten Meridiane des rechten Auges als correspondirend zugehört. Ein Linienbild, welches auf diesen symmetrisch zur Meridianebene geneigten correspondirenden Meridianen liegt, erscheint, wie der Versuch lehrt, in der Längsmittellinie des Sehfeldes und theilt dasselbe in eine rechte und linke Hälfte.

Diese Netzhautmeridiane nun sind für die meisten Augen die wahren mittlen Längsschnitte der Netzhäute, nicht aber sind es, wie wir schematisch annahmen und nur für Einzelne ganz richtig ist, die bei der gegebenen Augenstellung wirklich verticalen Meridiane der Netzhäute. Der Winkel, um welchen die beiden Halblinien gedreht werden müssen, und um welchen die beiden mittlen Längsschnitte von der verticalen Lage abweichen, ist nicht nur für verschiedene Beobachter verschieden, sondern auch, wie HELMHOLTZ[1] gefunden und DONDERS[2] bestätigt hat, selbst für einen und denselben Beobachter nicht constant, was sogleich seine Erklärung finden wird.

Die Abweichung der mittlen Längsschnitte von den bei Primärstellung der Augen verticalen Meridianen wurde von HERING[3] und HELMHOLTZ[4] gefunden, ausführlicher untersucht von VOLK-

1 HELMHOLTZ, Arch. f. Ophthalmologie X. 2. Abth. S. 3. 1864.

2 DONDERS, Onderzoekingen physiol. Labor. Utrecht III. 2. p. 45. 1875 und Arch. f. Ophthalmologie XXI. 3. Abth. S. 100. 1875. DONDERS beurtheilte die Lage der mittlen Längsschnitte nach dem scheinbaren Parallelismus zweier Trug- oder Halbbilder, deren eines dem einen, das andere dem andern Auge angehörte. Dies geht nur an, solange keine Veranlassung ist, die Bilder in einer zur Verticalen geneigten Ebene zu sehen. Denn ob solche Halbbilder parallel erscheinen, hängt nicht bloss von ihrer Lage auf den Netzhäuten ab, sondern auch sehr wesentlich davon, ob man dieselben in einer verticalen oder einer irgendwie geneigten Ebene localisirt („vorstellt", „zu sehen glaubt", „projicirt"). Wirklich auf zwei Längsschnitten gelegene Bilder erscheinen je nach den Umständen parallel, convergent oder divergent nach oben. Man darf daher, wie HERING (Beiträge zur Physiologie III. § 90. 1863) ausführlich gezeigt hat, den scheinbaren Parallelismus von Halbbildern, ausser in ganz besonderen Fällen, nicht zum ausschliesslichen Kriterium ihrer Lage auf der Netzhaut machen.

3 HERING, Beiträge zur Physiologie III. S. 175. April 1863.

4 HELMHOLTZ, Verh. d. naturhist.-med. Ver. z. Heidelberg. 3. Mai 1863 und Arch. f. Ophthalmologie IX. 2. Abth. S. 189. 1863.

MANN.[1] Weiters finden sich Messungen bei HELMHOLTZ[2], BERTHOLD[3], DOBROWOLSKY[4], VAN MOLL[5] und DONDERS (l. c.).

v. RECKLINGHAUSEN[6] sah an einem Kreuze, dessen vertikaler Schenkel in der Medianebene, der horizontale in der Blickebene parallel zur Frontalebene lag, wenn er dessen Mittelpunkt aus einer Entfernung von nicht mehr als 25 Ctm. mit einem Auge fixirte, den vertikalen Schenkel nach aussen, den horizontalen nach oben schwach concav gekrümmt. BERTHOLD[7] sah einen fixirten verticalen Faden, der senkrecht zur Gesichtslinie war, als einen schwach gekrümmten Bogen mit der Concavität nach rechts, wenn er mit dem rechten, nach links, wenn er mit dem linken Auge beobachtete. Er theilt mit, dass ein anderer Beobachter eine fixirte verticale Linie stets im Fixationspunkte geknickt sah. Solche Abweichungen müssten bei obigen Versuchen mit eingerechnet werden, wenn es auf sehr feine Messungen ankäme. Sie scheinen keine blossen Anomalien zu sein.

Wiederholt man den Versuch mit horizontalen Linien, so erscheint entweder die eine Halblinie der Wirklichkeit entsprechend als die gerade Fortsetzung der andern, oder die beiden Halblinien schliessen im Sehfelde wieder einen sehr stumpfen Winkel ein, der aber einer Geraden meist viel näher kommt, als der an den verticalen Halblinien beobachtete.

Der Winkel ist nach oben offen, wenn die linke Halblinie dem linken, die rechte dem rechten Auge entspricht.

Diesenfalls werden also die beiden Netzhäute in nicht correspondirenden Meridianen von der Blickebene geschnitten. Man kann es aber leicht dahin bringen, dass beide Augen eine kleine Rollung um die Gesichtslinie derart ausführen, dass nun correspondirende Meridiane und zwar die beiden mittlen Querschnitte in die Blickebene zu liegen kommen. DONDERS erreichte dies, indem er dicht vor den Scheiben oberhalb und unterhalb des fixirten Punktes einige horizontale und daher unter sich parallele feine Fäden quer über beide Scheiben hinweg spannte. Die Augen suchen und finden nun gleichsam von selbst diejenige Lage, bei welcher sich jeder Faden auf correspondirenden Querschnitten abbildet.[8] Ist dies erreicht, so erscheinen auch die beiden horizontalen Halblinien als eine zusammenhängende Gerade.

1 VOLKMANN, Monatsber. d. Berliner Acad. August 1863 und Physiol. Untersuchungen aus d. Gebiete d. Optik II. S. 199. 1864.
2 HELMHOLTZ, Physiol. Optik S. 703.
3 BERTHOLD, Arch. f. Ophthalmologie XI. 3. Abth. S. 107. 1865.
4 DOBROWOLSKY, ebenda. XVIII. 1. Abth. S. 53. 1872.
5 MOLL, Onderzoekingen in het physiol. Labor. III. 1. Utrecht 1875.
6 v. RECKLINGHAUSEN, Arch. f. Ophthalmologie V. 2. Abth. S. 134. 1859.
7 BERTHOLD, ebenda XI. 3. Abth. S. 141. 1865.
8 Vgl. das Nähere hierüber im Abschnitte über die Augenbewegungen.

Hat man auf diese Weise die queren Mittelschnitte der Netzhäute so zu sagen an die Blickebene gefesselt, was sich an den horizontalen Halblinien fortwährend controliren lässt, und bringt nun zugleich auch die verticalen Halblinien auf den Scheiben an, so ist der Winkel, um welchen man dieselben neigen muss, damit sie als eine zusammenhängende Gerade in der Längsmittellinie des Sehfeldes erscheinen, ein für jeden einzelnen Beobachter constanter. Die oben erwähnte Inconstanz hatte also ihren Grund darin, dass die Augen nicht bei allen Versuchen dieselbe Lage hatten, sondern in der Zeit von einer Beobachtung zur andern kleine Rollungen um die Gesichtslinie ausgeführt hatten.

Das wesentliche Endergebniss ist, dass wenn die queren Mittelschnitte in der Blickebene liegen, in den meisten Augen nicht die zur Blickebene senkrechten Netzhautmeridiane correspondirende sind, sondern dass der Längsmittellinie des Sehfeldes zwei andere Meridiane entsprechen, deren jeder mit der oberen Hälfte etwas nach aussen geneigt ist und mit dem wirklich verticalen Meridian einen sehr kleinen Winkel einschliesst, der zwischen 0^0 und etwa $1^0 15''$ schwankt. Für die meisten Augen divergiren also die mittlen Längsschnitte etwas nach oben, wenn die queren Mittelschnitte in der Blickebene liegen. Diese Abweichung in der Anordnung der Deckstellen von dem oben erörterten Schema wird als physiologische Incongruenz der Netzhaut bezeichnet. Dieselbe wurde von Helmholtz[1] und Volkmann[2] gefunden.[3]

Für die weitere Untersuchung legt man nach Volkmann durch den Fixationspunkt jeder Scheibe des Haploskops eine horizontale Gerade und eine auf dem Fixationspunkte stehende Halblinie, welche aber auf der einen Scheibe oberhalb, auf der andern unterhalb der Horizontalen liegt und bei vorhandener Netzhautincongruenz von der verticalen Lage in demselben Sinne und Grade abweicht, wie der mittle Längsschnitt von dem zur Blickebene senkrechten Netzhautmeridian. Haben die Augen des Beobachters keine Incongruenz,

1 Helmholtz, Verh. d. naturhist.-med. Ver. z. Heidelberg. 3. Mai 1863.

2 Volkmann, Sitzgsber. d. Berliner Acad. 13. Aug. 1863.

3 Siehe ausserdem die oben angeführte Literatur über die Divergenz der mittlen Längsschnitte. Helmholtz war der Meinung, dass eigentlich schon v. Recklinghausen (Arch. f. Ophthalmologie V. 2. Abth. S. 127. 1859) die Incongruenz der Netzhäute entdeckt habe. Derselbe sah ein rechtwinkliges Kreuz, das nicht über 250 mm. vom Gesichte entfernt war und mit einem Schenkel in der Medianebene mit dem anderen senkrecht zu derselben, mit seiner Ebene also schief zur Gesichtslinie lag, nicht rechtwinklig, sondern etwas verzerrt. Lag das Kreuz nahezu senkrecht zur Gesichtslinie, so verschwand die Täuschung, konnte also auch nicht in der Incongruenz der Netzhäute ihren Grund haben.

so können die stehenden Halblinien rechtwinklig zur Horizontalen liegen.

Parallel zur stehenden Halblinie legt man ferner auf beide Scheiben nach rechts oder beiderseits nach links eine zweite gerade Halblinie und zwar wieder auf der einen Scheibe oberhalb, auf der andern unterhalb des horizontalen Kreuzschenkels, wie Fig. 2 versinn-

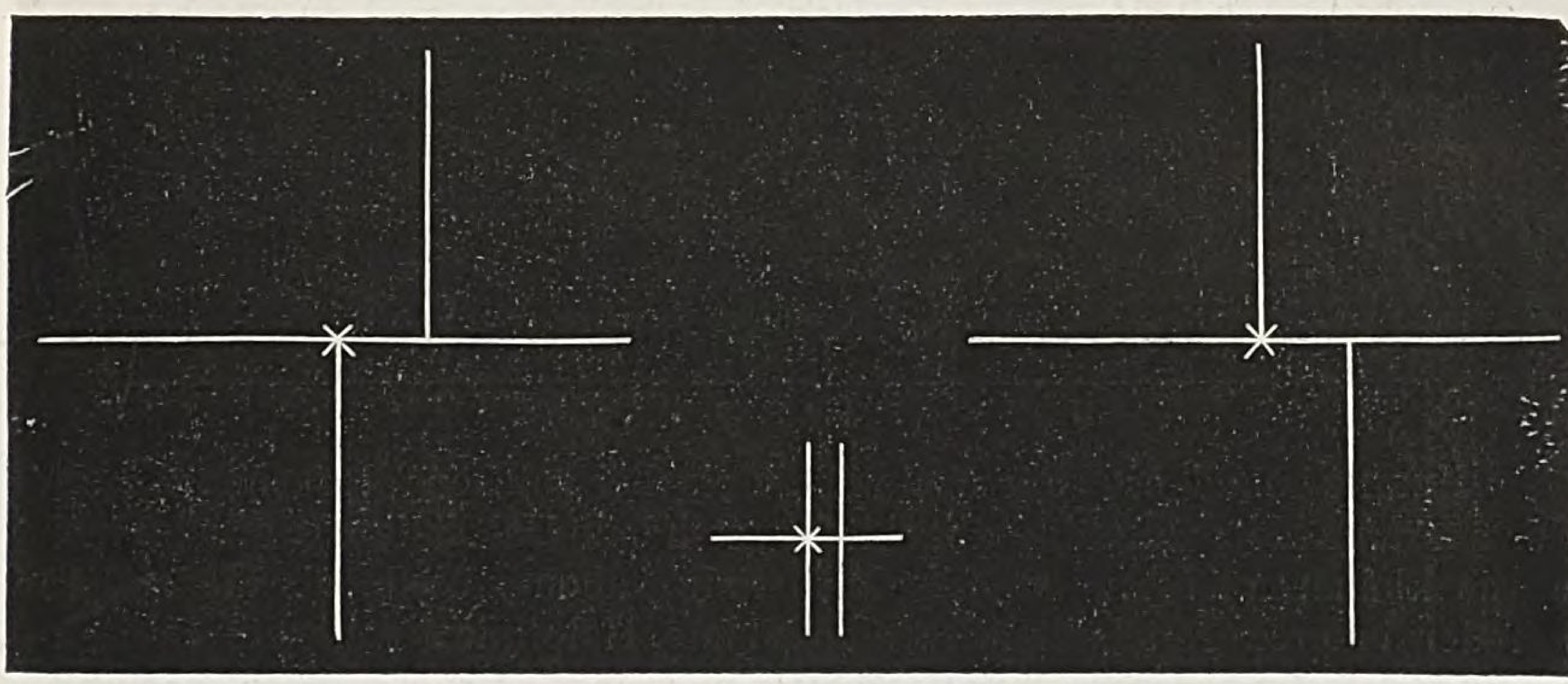


Fig. 2.

licht. Stellt man die Gesichtslinien auf die durch ein Kreuzchen markirten Mittelpunkte der Scheiben ein, so erscheint im Sehfelde ein rechtwinkliges Kreuz und eine zum stehenden Schenkel desselben parallele ganze Gerade, welche den Netzhautbildern der beiden seitlichen Halblinien entspricht, wie es die kleine Mittelfigur der Abbildung Fig. 2 in verkleinertem Maassstabe darstellt. Da die beiden seitlichen Halblinien sich beiderseits auf Längsschnitten abbilden, welche auf der als eben gedachten Netzhaut gleichen Abstand vom mittlen Längsschnitt haben und demselben parallel sind, so folgt aus dem Versuche, dass diese Längsschnitte correspondirende sind. Eine zweckmässige Modification dieses Versuchs von Volkmann[1] ist durch Fig. 3 versinnlicht.

Volkmann[1] legte auf jede Scheibe durch den Fixationspunkt eine ganze annähernd vertikale Linie, nicht blos eine Halblinie; es hat dies aber, wie Helmholtz[2] bemerkt, den Nachtheil, dass diese beiden stehenden Geraden auch dann als eine einfache vertikale Gerade im Sehfelde erscheinen, wenn sie nicht genau auf den mittlen Längsschnitten liegen, sich vielmehr auf etwas disparaten Längsschnitten abbilden (vergl. das Capitel über das Sehen mit disparaten Stellen). Diesenfalls werden aber die beiden stehenden Halblinien nicht als eine zusammenhängende Gerade,

1 Volkmann, Physiol. Untersuchungen im Gebiete der Optik I.
2 Helmholtz, Physiol. Optik S. 707.

sondern etwas gegeneinander verschoben erscheinen, weil ihre Bilder nun ebenfalls auf entsprechend disparate Längsschnitte fallen.

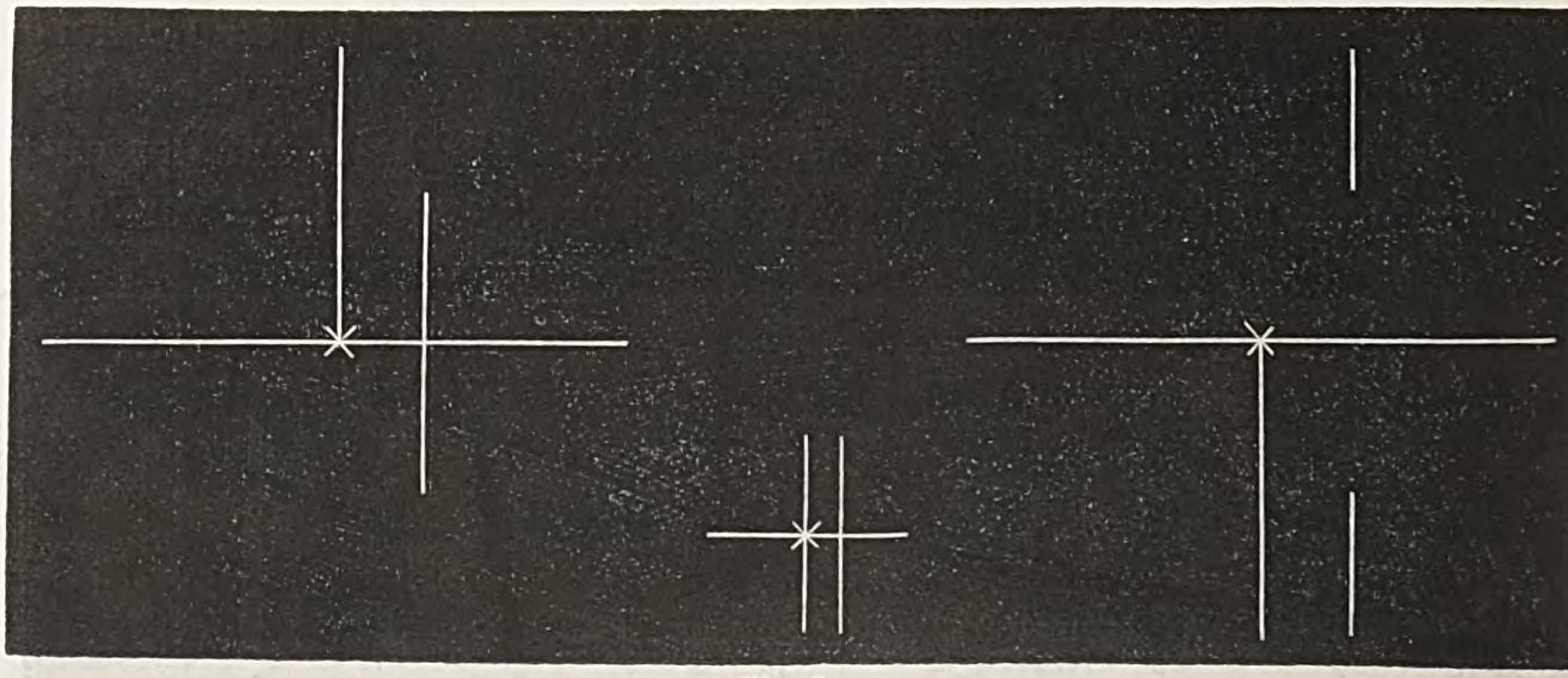


Fig. 3.

Hering[1] fand es wahrscheinlich, dass bei solchen Versuchen die auf der äusseren Netzhauthälfte abgebildete stehende Halblinie eigentlich einen etwas kleineren Abstand von der Mittellinie haben müsste, als die andere auf der inneren Netzhauthälfte abgebildete Halblinie, weil die Breitenwerthe auf der äusseren Netzhauthälfte vielleicht etwas rascher wachsen, als auf der inneren. Dem würde die von Kundt[2] gefundene Thatsache entsprechen, dass man bei Halbirung einer einäugig gesehenen zur Gesichtslinie senkrecht liegenden horizontalen Strecke, die äussere Hälfte derselben, welche sich also auf der inneren Netzhauthälfte abbildet, stets zu gross macht. Ist die Vermuthung Hering's richtig, so würde sich daraus eine zweite Art der physiologischen Incongruenz der Netzhäute ergeben. Ueber die Gründe dieser Ansicht vergleiche das Capitel über das Sehen mit disparaten Netzhautstellen.

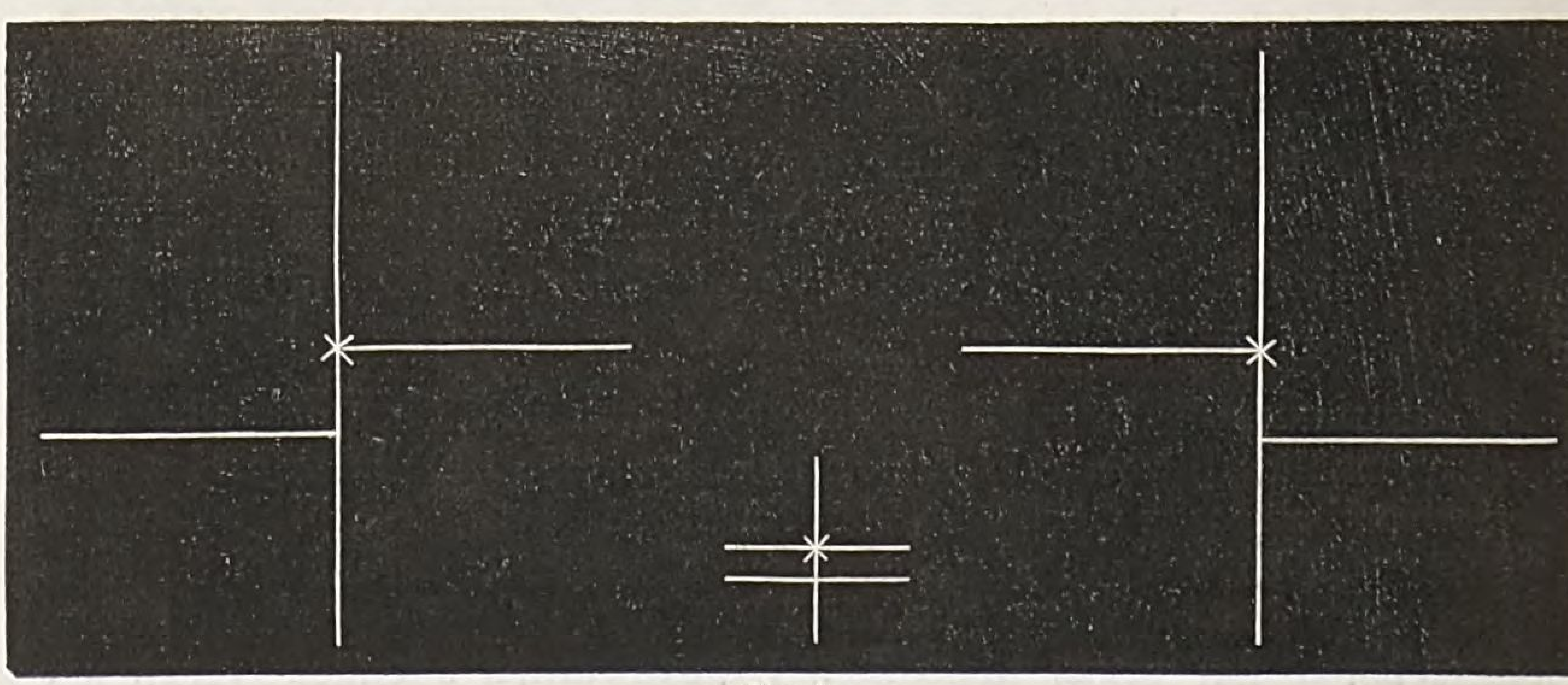


Fig. 4.

In analoger Weise lässt sich bei einer Anordnung der Halblinien, wie sie Fig. 4 versinnlicht, darthun, dass je zwei Querschnitte beider

1 Hering, Arch. f. Anat. u. Physiol. 1865. S. 161.
2 Kundt, Ann. d. Physik CXX. S. 118. 1863.

Netzhäute, welche in derselben Richtung und gleichweit vom mittlen Querschnitt abliegen, correspondirende Querschnitte sind.

Sind nun auf diese Weise die correspondirenden Längsschnitte einerseits und die correspondirenden Querschnitte andrerseits gefunden, so ergiebt sich daraus die beiderseitige Anordnung der Deckpunkte. Je zwei Netzhautpunkte, welche sowohl auf correspondirenden Längsschnitten als auf correspondirenden Querschnitten liegen, sind Deckpunkte. Vergl. Cap. II, Fig. 7.

Hering benutzte zur Untersuchung der correspondirenden Meridiane ausser verticalen und horizontalen Halblinien auch beliebig schräg gestellte und ausserdem Halbkreise von verschieden grossem Halbmesser, wie es Fig. 5 summarisch darstellt. Auf diese Weise lassen sich erstens

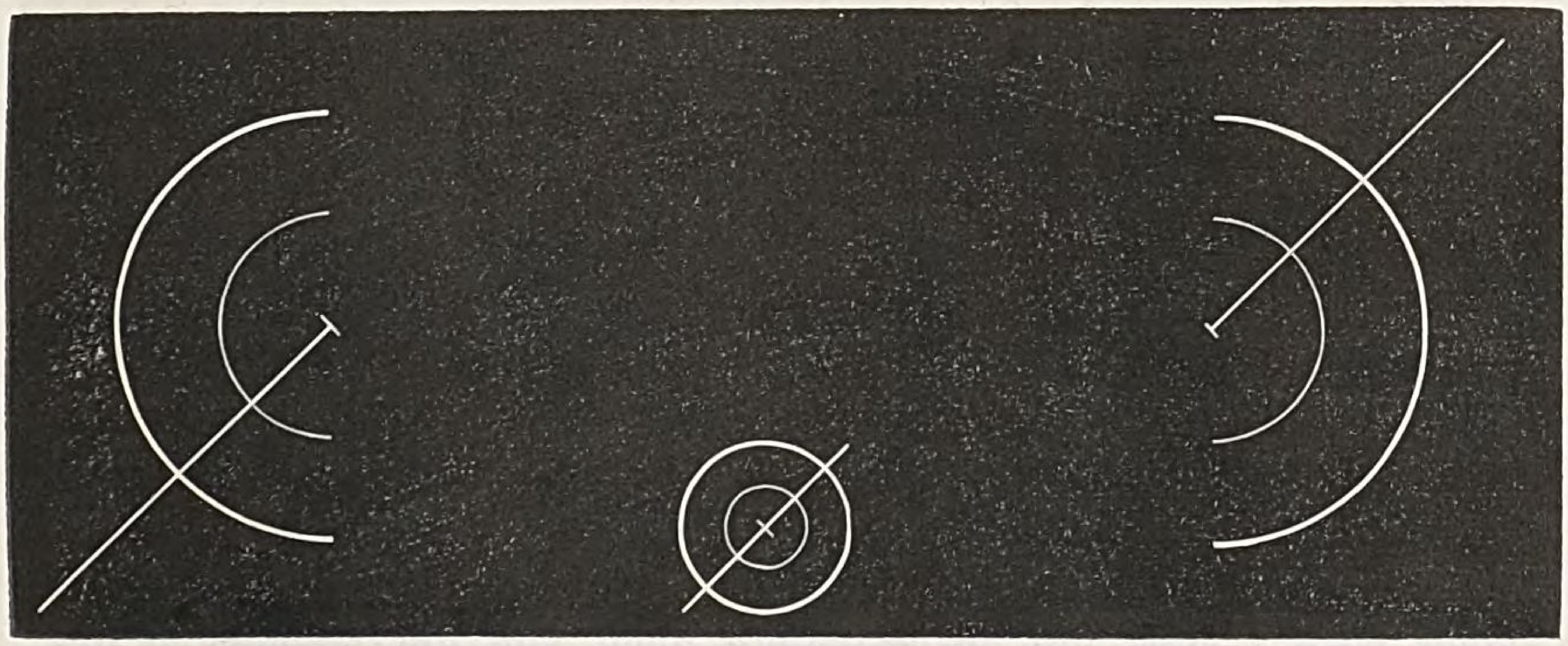


Fig. 5.

die correspondirenden Netzhautmeridiane und zweitens die correspondirenden Parallelkreise und somit auch die correspondirenden Punkte finden. Die Anwendung von Halbkreisen eignet sich aber nicht für diejenigen, in deren Netzhäuten die oben beschriebene Incongruenz erheblich vorhanden ist, weil in Folge derselben die Kreise verzerrt erscheinen. Auf solchen Netzhäuten sind Parallelkreise von gleichem Radius nicht genau correspondirende.

Eine zur Bestimmung der correspondirenden Meridiane sehr zweckmässige Modification der Methode benutzte Helmholtz. Man denke sich auf jede Scheibe der haploskopischen Vorrichtung drei einander nahe parallele und horizontale Linien gezeichnet, deren mittlere durch den Fixationspunkt geht, und diese Linien haploskopisch vereinigt. Entfernt man nun von der einen Scheibe die obere und untere, von der anderen die mittlere Linie, markirt aber beide Mittelpunkte und betrachtet die Scheiben haploskopisch, so sieht man wieder drei Linien, aber die mittlere, nur dem einen Auge zugehörige, wird genau parallel den beiden anderen, welche sich im andern Auge abbilden, nur dann erscheinen, wenn die mittlen Querschnitte beider Netzhäute genau parallel d. i. also hier in der Blickebene liegen.

Giebt man den Linien eine vertikale oder beliebige schräge Lage, so wird bei haploskopischer Vereinigung die mittle den beiden anderen im Allgemeinen nicht parallel erscheinen, man kann sie aber parallel sehen, wenn man z. B. die einfache Linie ein wenig in passendem Sinne um den Fixationspunkt dreht; der Winkel der dazu erforderlichen Drehung ist das Maass für die Divergenz der beiden entsprechenden Netzhautmeridiane. HELMHOLTZ[1] benutzte als äusseres Linienpaar die parallelen Contouren eines rothen Papierstreifens auf schwarzem Grunde, als einfache Mittellinie einen blauen Faden.

Endlich ist noch eine Modification der Substitutionsmethode[2] zu erwähnen, die aber weniger zur Untersuchung als zur Illustrirung der Correspondenz der Netzhäute brauchbar ist. Erzeugt man sich im einen Auge ein langdauerndes Nachbild einer einfachen Figur, öffnet nun das andere Auge und schliesst das mit dem Nachbild versehene, so erscheint unter günstigen Umständen das Nachbild im Sehfelde des offenen Auges so, als ob es sich auf der Netzhaut dieses Auges befände und zwar in einer Lage, welche mit der Lage des Nachbildes auf der anderen Netzhaut correspondirend ist. Das Nachbild wird also scheinbar von der einen Netzhaut auf correspondirende Stellen der anderen übertragen. Dies ist ein gutes Beispiel für die Thatsache, dass der Doppelnetzhaut ein einfaches Sehfeld entspricht.

Je weiter die Netzhautstellen, welche man auf ihre Correspondenz untersucht, von der Stelle des directen Sehens abliegen, desto breiterer Striche oder überhaupt grösserer Objecte muss man sich statt der Linien bedienen, desto unsicherer muss aber auch die Bestimmung werden, weil die Localisirung überhaupt zunehmend unsicher wird. Dies gilt insbesondere auch von der Umgegend des blinden Flecks. Ausführliche Untersuchungen über diese nach der Peripherie zunehmende Unsicherheit in der Bestimmung der correspondirenden Stellen haben MANDELSTAMM[3] und SCHOELER[4] und zwar ebenfalls nach der Substitutionsmethode ausgeführt. Sie fanden, dass diese Unsicherheit nicht nach allen Richtungen vom Centrum nach der Peripherie der Netzhaut gleich rasch zunimmt, vielmehr langsamer in der Richtung nach oben als in den andern Richtungen, betreffs welcher jedoch die Ergebnisse beider Beobachter nicht ganz übereinstimmen. SCHOELER fand, dass die Unsicherheit in den beiden seitlichen Richtungen am schnellsten wuchs. Vergl. übrigens das VIII. Capitel.

1 HELMHOLTZ, Physiol. Optik S. 704. Der oben Seite 358, Anm. 2 gerügte Fehler kommt hier nicht in Betracht; denn selbst wenn die beiden äusseren Fäden nicht streng parallel erscheinen, giebt man doch dem zwischen ihnen erscheinenden Faden eine symmetrische Mittellage.

2 HERING, Beiträge zur Physiologie I. S. 182.

3 MANDELSTAMM, Arch. f. Ophthalmologie XVIII. 2. Abth. S. 133. 1872.

4 SCHOELER, ebenda XIX. 1. Abth. S. 1. 1873.

Vor Einführung der Substitutionsmethode benutzte man eine andere, viel weniger sichere Methode zur Aufsuchung der correspondirenden Stellen. Man fixirte fest einen Punkt und bestimmte für ein kleines, vom Hintergrunde gut abstechendes, indirect gesehenes Object (Linien, Fäden, Stecknadelknöpfe u. s. w.) diejenigen Orte im Aussenraum, an welchen es nicht doppelt, sondern einfach gesehen wurde. Ueber diese Methode vergl. das Capitel über die Doppelbilder.

Joh. Müller [1], welcher zuerst den Satz von der Correspondenz oder, wie er sie nennt, der Identität der Netzhäute, ausführlicher erörterte, leitete ihn nicht blos aus dem Doppel- und Einfachsehen ab, sondern bewies ihn auch mit Hülfe der Druckphosphene.

Wenn man den Augapfel mit einer stumpfen Spitze im Bereiche der Netzhaut drückt, so sieht man einen feurigen Kreis im dunkeln Sehfelde. Drückt man nun beide Augäpfel, z. B. rechterseits, so sieht man im Allgemeinen zwei Kreise nach links neben- oder übereinander, man kann aber durch passendes Verschieben der einen Spitze den einen Kreis dem anderen näher und endlich beide zur Vereinigung bringen, dann sind identische Stellen gedrückt. Ebenso gelingt der Versuch auf der linken und auf der unteren Seite der Augäpfel, minder gut an der oberen. Doch sind diese Versuche sehr angreifend. Weiter sagt Müller: „Wenn bei geschlossenen Augen im subjectiven Sehfelde Nachbilder und Blendungsbilder haften, welche, da die afficirten Stellen identisch sind, auch nur einfach gesehen werden können, so werden diese nicht zu Doppelbildern, man mag die Augen in jeder beliebigen Convergenz der Achsen bewegen". Er that also auch auf diese Weise dar, dass das Einfachsehen der zweifach vorhandenen Netzhautbilder von der Lage auf der Netzhaut, nicht aber von der Augenstellung abhängig ist.

Die alte, insbesondere von Joh. Müller vertretene Ansicht, nach welcher die Correspondenz der Netzhäute auf einer angeborenen Einrichtung beruht, ist vielfach bestritten und behauptet worden, dass die Correspondenz der Raumwerthe auf beiden Netzhäuten erst im Laufe des individuellen Lebens erworben werde, obwohl die partielle Kreuzung der Sehnervenfasern im Chiasma und das oft mit Sicherheit beobachtete Vorkommen correspondirender partieller Lähmungen der Netzhaut beweist, dass die Correspondenz auf anatomischer Grundlage beruht. Selbst wenn man der Gesichtsempfindung jede ursprünglich räumliche Eigenschaft aberkennen und die Raumwerthe der Netzhautstellen lediglich als einen Erwerb individueller Erfahrung ansehen will, muss man auf jene Thatsachen Rücksicht nehmen und zugestehen, dass zwischen correspondirenden Stellen eine angeborene, auf anatomischer Grundlage beruhende functionelle Beziehung besteht, durch welche, möge sie nun eine sensorische oder motorische oder beides zugleich sein, der räumlichen Auslegung der von Deckstellen kommenden Empfindungen von vornherein eine bestimmte Bahn angewiesen wird.

Dass schon die Gesichtsempfindungen des Neugeborenen räumliche Eigenschaften haben, deren genauere Unterscheidung derselbe allerdings ebenso erlernen muss, wie er die feineren qualitativen Verschiedenheiten

1 Joh. Müller, Zur vergleich. Physiologie des Gesichtssinns S. 71. 1826.

der Empfindung erst allmählich zu erfassen erlernt, dies ist eine Annahme, zu welcher der Physiolog vollkommen berechtigt ist, weil manche Thiere schon unmittelbar nach der Geburt aus Mutterleib oder Ei sichere räumliche Wahrnehmungen machen.

ZWEITES CAPITEL.

Die Localisirung im ebenen Sehfelde.

Die Anordnung des in einem gegebenen Sehfelde Erscheinenden ist unter Vermittlung des Doppelnetzhautbildes in gesetzmässiger Weise abhängig von der Anordnung der entsprechenden Dinge im Aussenraume.

Um zu untersuchen, inwieweit günstigsten Falls jene scheinbare und diese wirkliche Anordnung übereinstimmen, hat man meist den einfachen Fall gewählt, in welchem die Aussendinge in einer Ebene liegen, deren scheinbare Lage im Sehraume mit ihrer wirklichen Lage möglichst übereinstimmt, so dass die Ebene des Sehfeldes sich mit der des wirklichen Objectfeldes entweder deckt, oder wenigstens ihr parallel ist. Letzteren Falls werden zwar die im Objectfelde liegenden Figuren in falscher Entfernung und falscher Grösse gesehen, aber ihre relative Anordnung im Sehfelde wird dadurch nicht alterirt. Damit alle in einer Ebene gelegenen Punkte sich auf Deckstellen abbilden, wäre nöthig, dass dieselbe im Punkthoropter (vergl. Capitel III) läge. Eine Ebene als Punkthoropter scheint aber nur möglich, wenn der Blickpunkt sehr fern ist; es müssten denn die Deckpunkte etwas anders angeordnet sein, als es nach den bisherigen Untersuchungen angenommen werden muss. Man ist deshalb darauf angewiesen, nur mit einem Auge zu untersuchen, was hier deshalb angeht, weil, wie wir gesehen haben, das nur mit einem Auge Gesehene in einem gegebenen Sehfelde ganz in derselben Anordnung erscheint, als ob es bei derselben Augenstellung mit correspondirenden Punkten beider Netzhäute gesehen würde.

Bei Primärstellung des Kopfes und der Augen ist es verhältnissmässig am leichtesten, ein bestimmt gelegenes, nämlich ein vertikales und zur scheinbaren Frontalebene paralleles Sehfeld zu bekommen. Wir haben schon oben gefunden, dass, wenn man vor das Gesicht einen der Frontalebene parallelen vertikalen Schirm anbringt, auf

welchem sich gerade gegenüber jedem Auge je ein Fixationspunkt befindet, man anderweite auf diesem Schirme gelegene, dem einen oder dem andern Auge sichtbare Linien in einer der scheinbaren Frontalebene nahezu parallelen Ebene sieht. Nur die scheinbare Entfernung dieses ebenen Sehfeldes entspricht nicht immer der wirklichen Entfernung des Schirmes.

Wir wählen also als Objectfeld eine zur Gesichtslinie des einen Auges senkrechte Ebene, und benützen dazu eine Scheibe der oben beschriebenen haploskopischen Vorrichtung, auf welcher wir die zur Untersuchung bestimmten Linien und Punkte anbringen. Um zu erreichen, dass trotz einäugigem Sehen auch das andere Auge immer genau die vorgeschriebene Stellung beibehält, machen wir auf die Mitte der anderen, leeren Scheibe eine Marke, welche diesem Auge als Fixationspunkt dient, so dass dasselbe also nur die Marke und im Uebrigen eine gleichmässige leere Fläche sieht. Brauchen wir ein grösseres Objectfeld, als die Scheibe bietet, so bringen wir vor das Auge, welches nur die Marke sehen soll, einen verticalen Spiegel (*ss*. Fig. 6), der unter 45° zur Gesichtslinie geneigt ist, wie es die Figur schematisch im Durchschnitte darstellt, und können nun ein grosses Objectfeld (*o o*) in beliebiger Entfernung vom andern Auge aufstellen, während eine gleich grosse aber leere Scheibe (*o' o'*) mit der Marke (*f'*) so seitwärts aufgestellt wird, dass ihr Spiegelbild in dieselbe Entfernung wie das Objectfeld (*o o*) zu liegen kommt.

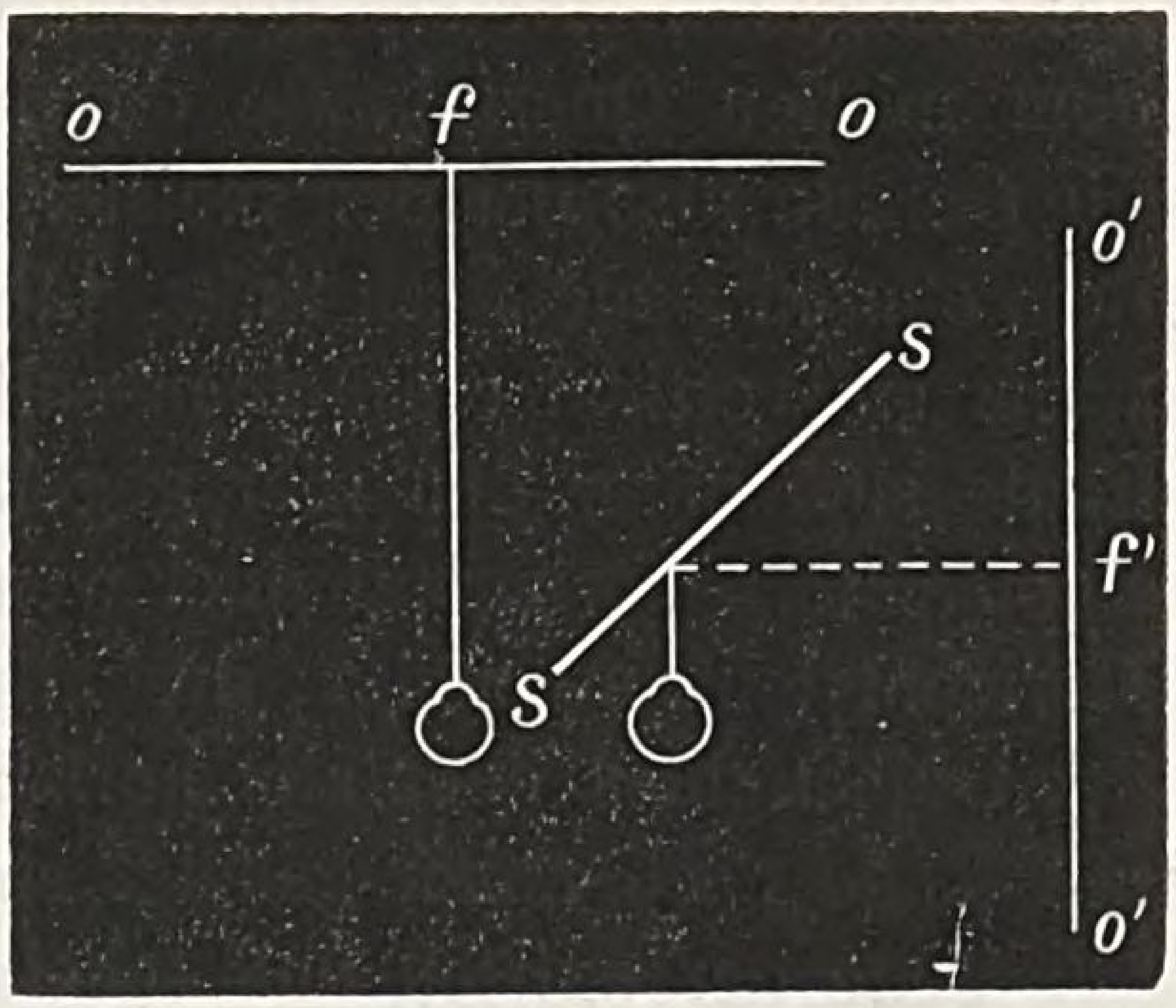


Fig. 6.

Lassen sich die Figuren, welche das eine Auge sehen soll, auf einer entfernten, zur Gesichtslinie senkrechten Wand anbringen, so stellt sich die Gesichtslinie des andern Auges, auch wenn dasselbe verdeckt oder geschlossen ist, wenigstens annähernd mit auf den vom offenen Auge fixirten Punkt ein, so dass dann beide Gesichtslinien nicht erheblich vom Parallelismus abweichen. Man braucht dann, wenn es nicht auf besondere Genauigkeit ankommt, für dieses Auge keine besondere Vorrichtung, um es mit Hilfe eines Fixationspunktes in die richtige Stellung zu bringen.

Wenn man die beschriebenen Vorsichtsmaassregeln ausser Acht lässt, kann man grosse Fehler begehen. Die Anordnung des im Sehfelde Er-

scheinenden hängt beim einäugigen Sehen keineswegs blos von der Anordnung der Netzhautbilder und also mittelbar von der Anordnung der entsprechenden Aussenobjecte, sondern auch von der Lage und Form des Sehfeldes ab, in welchem sie erscheinen.[1]

Zwei verticale Coconfäden, hinter welche man ein Blatt so hält, dass der obere Rand desselben vom Gesichte weggeneigt ist, können bei einäugiger Betrachtung als zwei nach oben divergirende Linien auf dem Blatte erscheinen. Das Sehfeld ist dann zur wirklichen Ebene der Fäden geneigt. Rechtwinklige Kreuze können auf diese Weise schiefwinklig, Kreise als Elipsen gesehen werden; gerade Fäden können, wenn sie auf einer dahinter gelegenen Kugelfläche gesehen werden, gekrümmt erscheinen u. A. m. Auch auf die Stellung des anderen Auges, welches geschlossen ist oder wenigstens die zum Versuche benutzten Linien u.s.w. gar nicht sieht, kommt es oft an, wie später gezeigt werden wird. Deshalb muss, wenigstens bei einem Theil der hierhergehörigen Beobachtungen, die Stellung dieses Auges controlirt und ihm insbesondere die Primärstellung gegeben werden.

Soll eine durch den fixirten Punkt des Objectfeldes gehende Gerade unter den hier gegebenen Umständen vertical erscheinen, so muss sie, wie besonders Volkmann[2] ausführlich dargelegt hat, so gelegen sein, dass sie sich auf dem mittlen Längsschnitt der Netzhaut abbildet, soll sie horizontal erscheinen, so muss ihr Bild auf dem mittlen Querschnitte der Netzhaut liegen. Ersterenfalls muss die Gerade also bei den meisten Beobachtern für das linke Auge mit dem oberen Ende nach links, für das rechte nach rechts geneigt sein, wenn sie vertical erscheinen soll. Die mittlen Querschnitte der Netzhäute sind unter den hier gegebenen Bedingungen bei den meisten Beobachtern horizontal oder wenig mit dem äusseren Ende unter die Horizontalebene geneigt; deshalb wird die horizontal scheinende Linie des Objectfeldes ebenfalls horizontal oder ein wenig mit dem äusseren Ende nach unten geneigt sein.

Jede der fixirten und scheinbar verticalen Geraden des Objectfeldes parallele Linie erscheint, wenn sie nicht zu lang ist, ebenfalls vertical, jede, der fixirten und scheinbar horizontalen Geraden parallele und nicht zu lange Linie ebenfalls horizontal. Helmholtz hat in Fig. 7 schematisch dargestellt, welche Lage solche Linien im Objectfelde für sein rechtes und linkes Auge haben müssen, um ihm vertical, beziehentlich horizontal zu erscheinen.[3] Für Beobachter,

1 Vgl. Hering, Beiträge zur Physiologie II. § 52—54. 1862 und Volkmann, Physiol. Untersuchungen I. S. 139. 1863.

2 Volkmann, Physiol. Untersuchungen im Gebiete der Optik II. 1864.

3 Bei haploskopischer Vereinigung der beiden Hälften der Figur deckten sich für Helmholtz die weissen und die schwarzen Linien, ohne eigentlich zu verschmelzen, weil dies durch ihre verschiedene Farbe verhindert wird.

deren Netzhäute eine geringere oder gar keine Incongruenz zeigen, müssen die scheinbar verticalen Linien des Objectfeldes entsprechend weniger oder gar nicht zu den scheinbar horizontalen Linien des Objectfeldes geneigt sein.

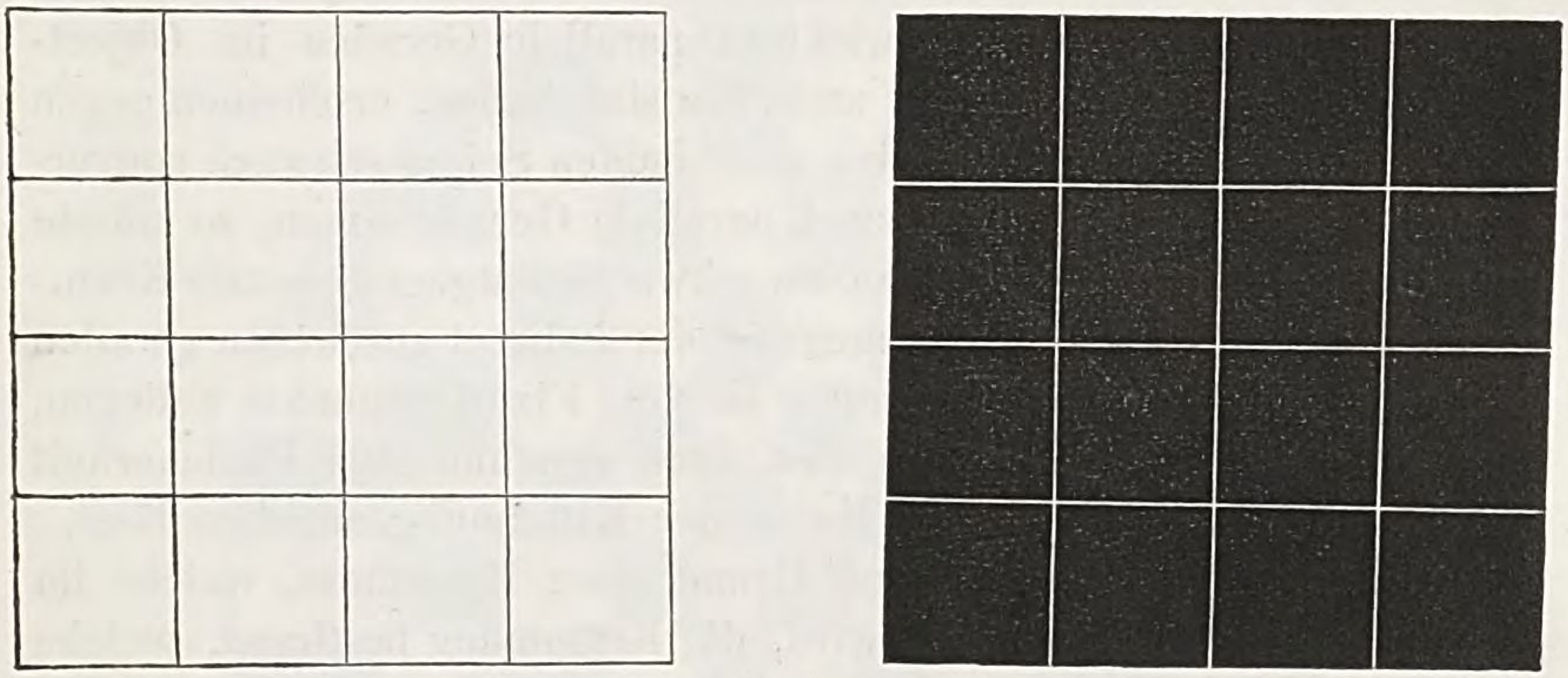


Fig. 7.

Aus dem Erörterten folgt, dass ein im Objectfelde gelegenes rechtwinkliges Kreuz, dessen einer Schenkel vertical, der andere horizontal liegt, weder mit dem rechten noch mit dem linken Auge gesehen rechtwinklig erscheint, sondern dass ersterenfalls der rechte obere und der linke untere, letzterenfalls der linke obere und der rechte untere Winkel etwas grösser als ein Rechter gesehen wird, immer vorausgesetzt, dass die Incongruenz der Netzhäute bei dem Beobachter vorhanden ist. Um das Kreuz rechtwinklig zu sehen, muss man den verticalen Schenkel für das rechte Auge mit dem oberen Ende etwas nach rechts, für das linke entsprechend nach links neigen, so dass das wirkliche Kreuz etwas schiefwinklig wird. Der Winkel, unter welchem sich die beiden Schenkel durchschneiden, entspricht dem Winkel, unter welchem der mittle Längsschnitt zum mittlen Querschnitt der Netzhaut geneigt ist.

Bei den bis jetzt erörterten Thatsachen kam es auf eine bestimmte Lage der im Objectfelde gelegenen Linien in Beziehung auf die Lage der Netzhautquerschnitte an; für die folgenden ist die Lage der beobachteten Linien im Objectfelde gleichgültig.

Jede durch die Fixationspunkte gehende Gerade des Objectfeldes erscheint auch im Sehfelde als eine Gerade.[1] Nicht dasselbe gilt von den ausserhalb des Fixationspunktes verlaufenden Geraden.

1 Vergl. jedoch die im vorigen Capitel S. 359 erwähnte Beobachtung v. RECKLINGHAUSEN'S und BERTHOLD'S.

Es wurde oben gesagt, dass die indirect gesehenen Geraden im Objectfelde, welche der fixirten scheinbar Verticalen oder Horizontalen parallel erscheinen sollen, nicht zu lang sein dürfen. Erstrecken sie sich nämlich zu weit über das Objectfeld, so erscheinen sie gekrümmt derart, dass sie ihre Concavität dem Fixationspunkte zuwenden. Jede zwei beliebig gerichtete parallele Geraden im Objectfelde, die den Fixationspunkt zwischen sich haben, erscheinen gegen letzteren etwas concav und also nach beiden Seiten schwach convergirend.[1] Wollte man sie als zwei parallele Gerade sehen, so müsste man ihnen auf dem Objectfelde eine schwache entgegengesetzte Krümmung geben. Diese Scheinkrümmung der indirect gesehenen geraden Linien ist um so grösser, je weiter sie vom Fixationspunkte abliegen, ohne dass sich jedoch wegen der dann zunehmenden Unsicherheit der Localisirung ein genaues Maass der Krümmung angeben lässt.

HELMHOLTZ[2] hat später auf Grund einer Hypothese, welche im II. Abschnitt zu erörtern sein wird, die Krümmung bestimmt, welche indirect gesehene Linien seiner Ansicht nach haben müssen, um als Gerade zu erscheinen, und diese Krümmungen durch Fig. 8 dargestellt. Die Strecke *ee* bedeutet den Abstand, in welchem man sich das beobachtende Auge senkrecht über dem Mittelpunkte der Figur zu denken hat, wenn dasselbe die hyperbolisch gekrümmten Linien der Zeichnung als parallele Gerade sehen soll. Die Figur, deren sich HELMHOLTZ zum Versuche bediente, war im Verhältniss von 16:3 grösser als Figur 8 und an einer verticalen Wand befestigt; sie wurde aus einer Entfernung von 20 Cm. in ihrem Mittelpunkte fest fixirt, wobei die Gesichtslinie senkrecht zur Wand lag.

Nach einer Beobachtung von KÜSTER[3], welcher mit Reihen electrischer Funken im Dunkelraume experimentirte, müssten die Linien

1 HERING, Beiträge zur Physiologie III. S. 189. 1863. Schon früher hatte v. RECKLINGHAUSEN (Arch. f. Ophthalmologie V. 2. Abth. S. 127. 1859) und NAGEL (Das Sehen mit zwei Augen S. 108. 1861) solche Scheinkrümmungen an den Doppelbildern von geraden Linien beobachtet, die jedoch zum Theil auf die im I. Capitel S. 359 erwähnten Scheinkrümmungen verticaler Linien zurückzuführen sind.

2 HELMHOLTZ, Physiol. Optik S. 553.

3 KÜSTER, Arch. f. Ophthalmologie XXII. 1. Abth. S. 149. KÜSTER selbst glaubte allerdings durch seine Versuche die Angaben von HELMHOLTZ streng erwiesen zu haben. Die Construction des von ihm benutzten Apparates beruht jedoch auf einem Missverständniss dessen, was HELMHOLTZ unter den Directions- oder Richtungskreisen des Sehfeldes versteht. Der dadurch eingeführte Fehler hat aber nicht viel auf sich, um so weniger als die Localisirung im indirecten Sehen etwas Unsicheres hat und man dabei immer zum Schematisiren d. h. im besonderen Falle eher dazu geneigt ist, eine Linie oder Funkenreihe als geradlinig denn als krumm anzusehen. Deshalb müsste eine experimentelle Untersuchung der Hypothese von HELMHOLTZ nach der Methode der mittlen Fehler angestellt werden, wenn sie streng beweiskräftig sein sollte.

eine etwas schwächere hyperbolische Krümmung als die der Fig. 8 haben, um unter den genannten Umständen als Gerade zu erscheinen.

Der beschriebenen Scheinkrümmung der geraden Linien des Objektfeldes entspricht es nun ferner, dass eine Scheibe, ein Quadrat

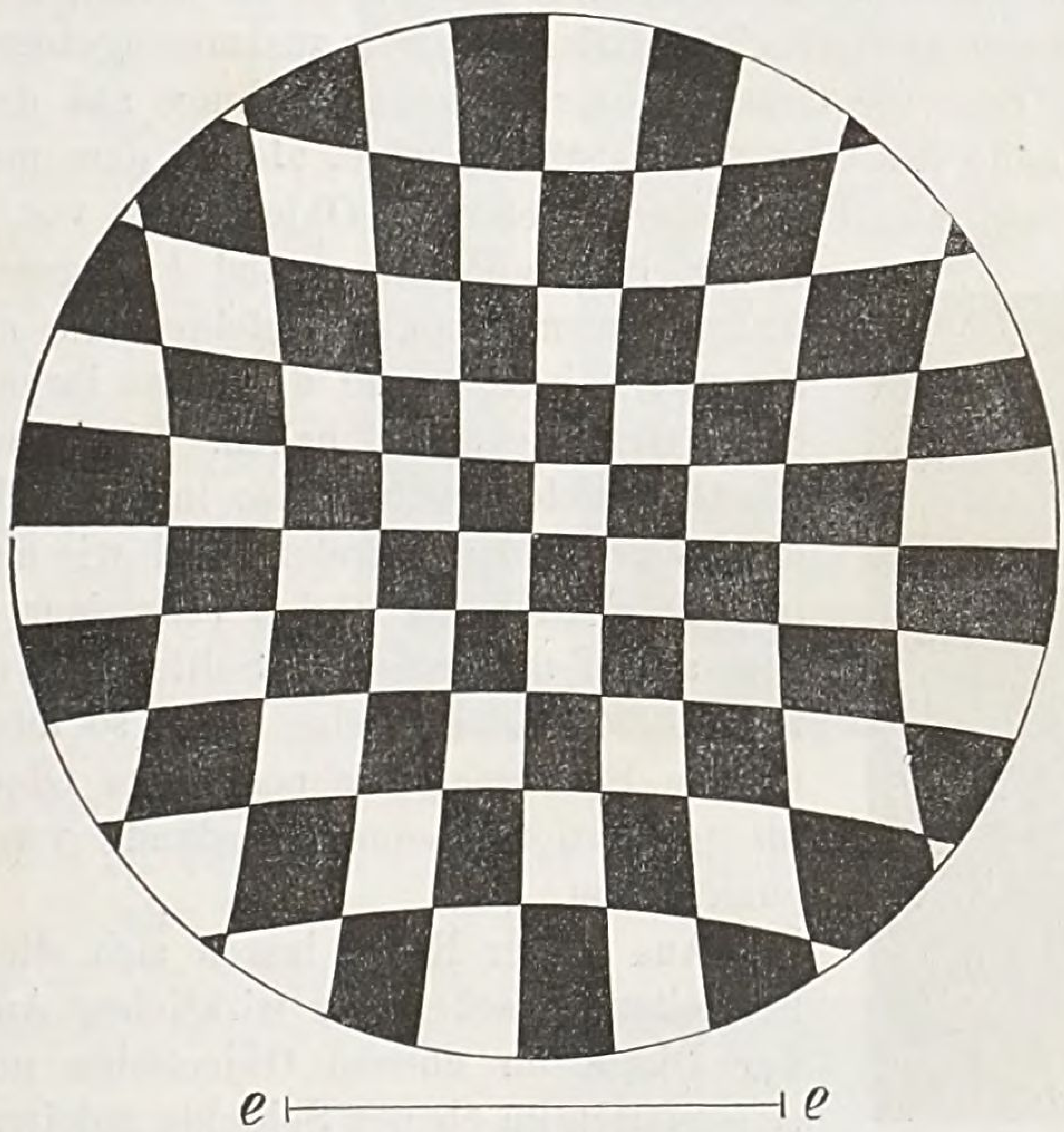


Fig. 8.

oder dergleichen um so kleiner erscheinen, je excentrischer sie im ebenen Objectfelde liegen. v. Wittich[1] und Aubert[2] haben einige derartige Beobachtungen mitgetheilt. Helmholtz[3] hat dann darauf hingewiesen, dass diese scheinbare Verkleinerung in der radialen Richtung des Sehfeldes bedeutender ist, als in der tangentialen. Die Fig. 8 zeigt dies nach Helmholtz's Angabe ebenfalls. Dieselbe erschien ihm aus passender Entfernung gesehen, wie ein Schachbrett mit quadratischen und also überall gleich grossen Feldern. Eine kreisförmige Scheibe auf dem ebenen Objectfelde erschien ihm, wenn sie peripher lag, elliptisch, so dass der kurze Durchmesser in Bezug auf die Mitte des Sehfeldes radial gerichtet war.

1 v. Wittich, Arch. f. Ophthalmologie IX. 3. S. 10. 1863.
2 Aubert, Physiologie der Netzhaut S. 252. 1865.
3 Helmholtz, Physiol. Optik S. 554.

Man kann also die Scheinkrümmungen der Geraden und die Scheinverkleinerung der indirect gesehenen Theile des Objectfeldes, welche in der radialen Richtung stärker ist, als in tangentialer, unter eine allgemeine Regel bringen, indem man sagt: die scheinbare Anordnung des im ebenen Objectfelde Liegenden ist derart, als ob das Objectfeld sich allerseits in radialer Richtung zusammengezogen hätte, jedoch so, dass die Grösse dieser Zusammenziehung auf dem peripheren Theile des Objectfeldes stärker wäre, als auf dem mehr centralen. Stellt *abc* Fig. 9 einen Sector des Objectfeldes vor, so würden z. B. die Punkte *a* und *b* wegen der radialen Contraction des Sehfeldes in α und β zu liegen scheinen, *c* und *d* würden ihren scheinbaren Ort in γ und δ haben. Die Figur *abdc* des Objectfeldes würde also im Sehfelde durch die Figur $\alpha\beta\delta\gamma$ vertreten, und wie man sieht, in radialer Richtung stärker verkleinert erscheinen, als in tangentialer. Sollte die Verkleinerung eine gleichmässige sein, so müsste die radiale Scheinverschiebung jedes Objectpunktes proportional seinem Abstande vom Mittelpunkte sein.

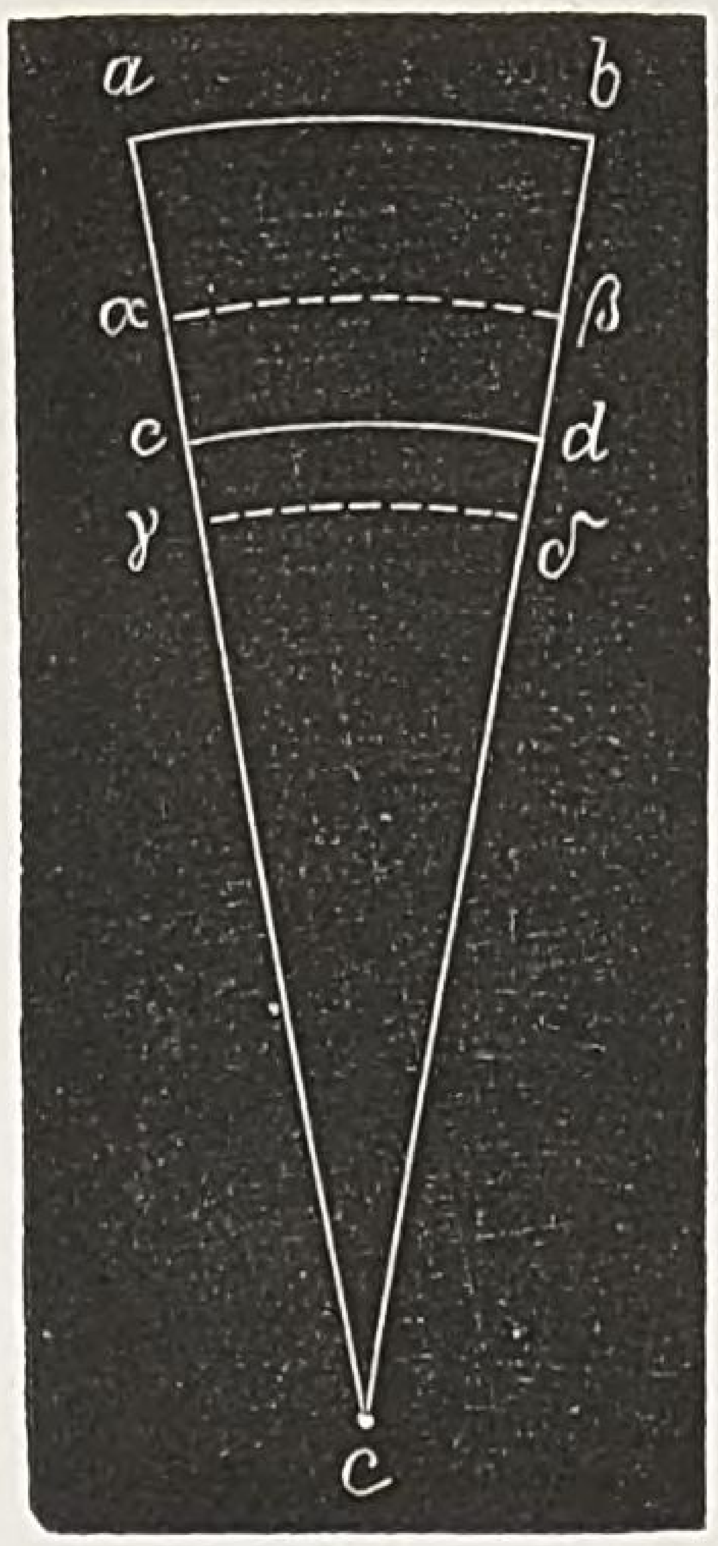


Fig. 9.

Aus dieser Regel lassen sich die Unähnlichkeiten zwischen der wirklichen Anordnung der Dinge im ebenen Objectfelde und ihrer scheinbaren im ebenen Sehfelde ableiten; allerdings nur dem Sinne nach, nicht auch dem Maasse nach. Doch liegen über Letzteres noch zu wenig Untersuchungen vor, um darüber etwas Bestimmtes aussagen zu können.

Spitze Winkel erscheinen zu gross, stumpfe zu klein. In Fig. 10 ist *ad* in Wirklichkeit eine Gerade, doch erscheint die rechte Hälfte dieser Linie nicht als Fortsetzung der linken, sondern etwas nach oben verschoben. Vielmehr erscheint *ad'* als eine Gerade, obwohl die beiden Hälften derselben in Wirklichkeit gegen einander verschoben sind. Fig. 11 zeigt, wie diese Täuschung durch das Falschsehen der Winkel bedingt ist. Der wirkliche spitze Winkel *ncd* erscheint zu gross, etwa als Winkel *ncd''*. Ebenso erscheint statt des wirklichen Winkels *abm* der Winkel *a'bm*. Die Verlängerung des Schenkels *a'b* würde die Gerade *on* in *c'* treffen. Hier also und nicht in *c* müsste die wirkliche Linie *cd* ansitzen, um als Fortsetzung der wirklichen Linie *ab* zu erscheinen. Legen wir nun im Punkte *c'* eine andere wirkliche Linie *c'd'* unter demselben Winkel

an, so erscheint sie in $c'\,d'''$, also als scheinbare Verlängerung der scheinbaren Linie $a'\,b$.

Durch das Falschsehen eines Winkels bekommen eigentlich beide Schenkel desselben eine veränderte Lage im Sehfelde, doch wird sie je nach den Umständen bald mehr auf den einen, bald mehr auf den andern Schenkel bezogen. In Fig. 12[1] erscheinen die langen schrägen wirklich parallelen Geraden nicht parallel, weil jede Gerade gleichsam aus einer Anzahl Winkelschenkeln besteht, deren jeder im Vergleich zu seiner wirklichen Lage verschoben erscheint. Da also jeder Bruchtheil der Linie eine falsche scheinbare Richtung hat, so erscheint auch die ganze Linie in falscher Richtung.

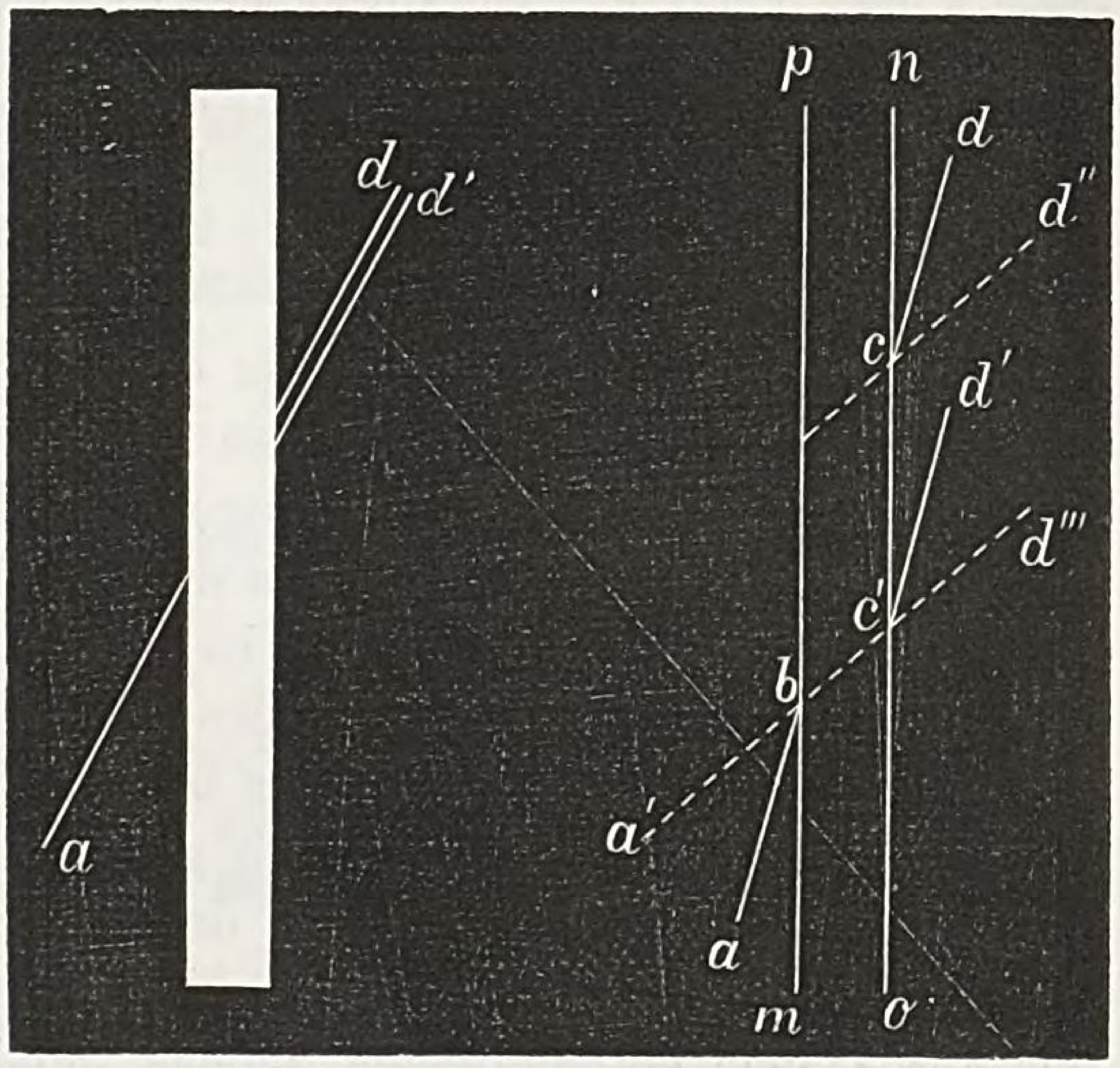


Fig. 10. Fig. 11.

Dass die Täuschung über die Lage der parallelen langen Linien in Fig. 12 und ähnlichen Figuren sich im Wesentlichen auf ein Falschsehen der Winkel zurückführen lässt, wurde von Hering[2] gezeigt. Da solche Täuschungen auch im Nachbilde deutlich fortbestehen, so lassen sie sich nicht allein als aus der Augenbewegung resultirend ansehen, durch welche, wie Helmholtz[3] angab, die Täuschung bedeutend vergrössert wird. Ueber verschiedene Versuche einer Erklärung des Falschsehens der schiefen Winkel vergl. insbesondere Helmholtz und den II. Abschnitt.

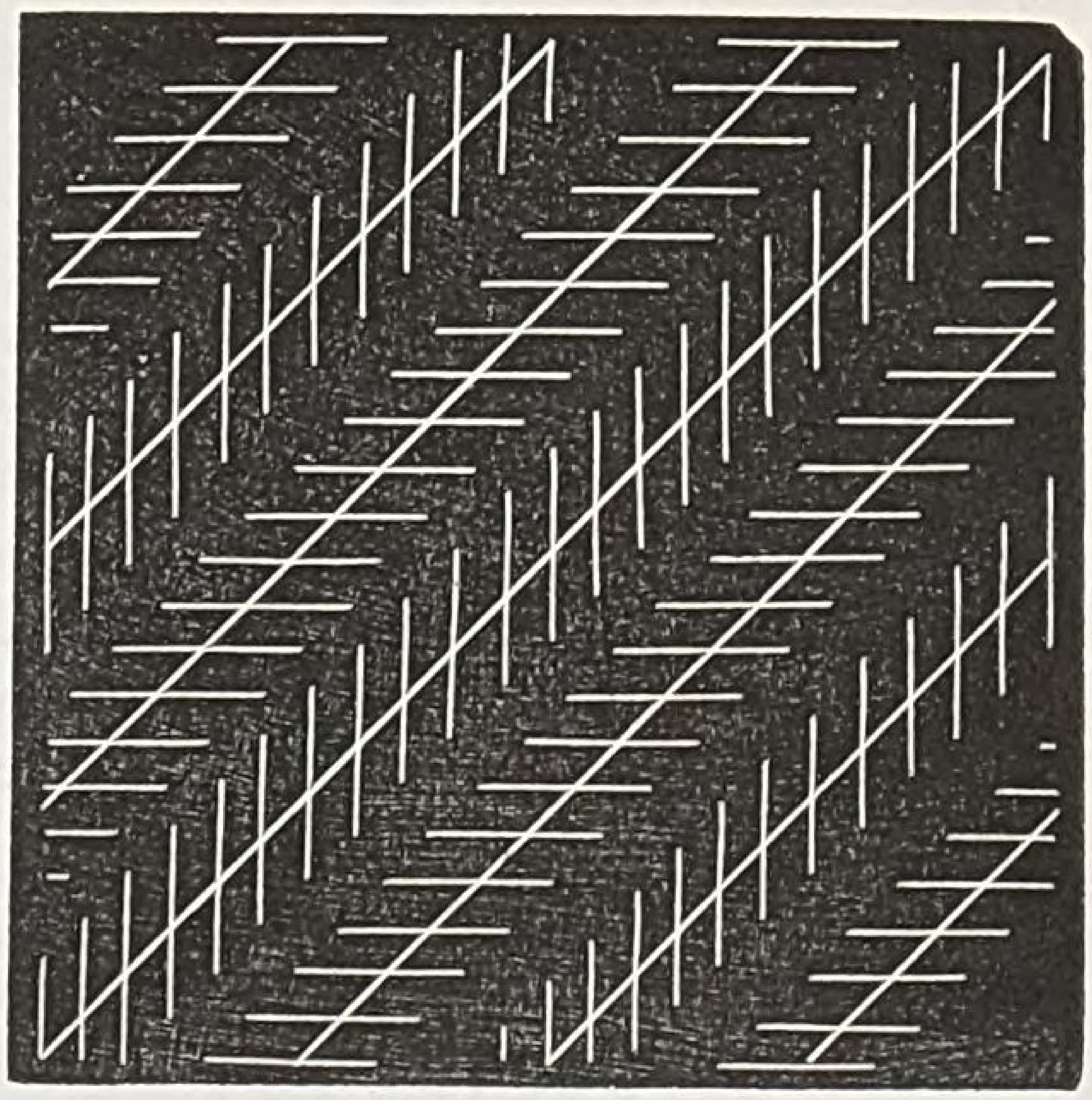


Fig. 12.

1 Die Figur ist eine auf noch stärkere Täuschung berechnete Abänderung eines von Zöllner mitgetheilten Musters. Ann. d. Physik CX. S. 500. 1860.

2 Hering, Beiträge zur Physiologie I. § 26. 1861.

3 Helmholtz, Physiol. Optik S. 564.

Im ZÖLLNER'schen Muster stehen die langen Parallellinien vertical, doch fand schon ZÖLLNER, dass die Täuschung am grössten ist, wenn diese Linien unter 45° zur Blickebene geneigt sind. Solche Linien werden nämlich am unsichersten localisirt, während von horizontalen und verticalen Linien das Gegentheil gilt (vergl. Abschnitt II.). Die Folge ist, dass die Scheinverschiebung bei schräger Lage der langen Linien zum grössten Theile diese betrifft, während sie bei verticaler oder horizontaler Lage derselben vorzugsweise den dann schrägen kurzen Linien zufällt.

Ueber die Localisirung der in der Umgebung des blinden Flecks gelegenen Netzhautbilder bestehen zwischen den verschiedenen Beobachtern widerstreitende Meinungen. E. H. WEBER[1], FICK[2], VOLKMANN[3], HELMHOLTZ[4] meinen, dass die den blinden Fleck umgebenden Bilder so lokalisirt werden, wie es ihrer Lage im Vergleich zu den übrigen Theilen des Netzhautbildes entspricht, als ob also die empfindliche Netzhautschicht an der blinden Stelle gar nicht unterbrochen wäre. v. WITTICH[5] dagegen giebt an, dass ihm die umgebenden Bilder in der Richtung nach der Stelle des blinden Fleckes verzogen erscheinen, etwa so, als ob die Grenztheile der vom Sehnerv durchbrochenen empfindlichen Schicht unmittelbar zusammenstiessen. FUNKE[6] meint, dass je nach den Umständen bald die eine, bald die andere Art der Localisirung eintrete. Alle stimmen darin überein, dass die Continuität des Sehfeldes trotz der Lücke in der empfindlichen Schicht nicht unterbrochen ist und dass das, was man an der entsprechenden Stelle des Sehfeldes zu sehen meint, ganz abhängig ist von dem, was sich auf den angrenzenden Theilen der Netzhaut abbildet.

Man denke sich die Netzhaut als eine mit den Netzhautbildern bemalte Kautschukplatte und in dieselbe an der Stelle des blinden Fleckes ein Loch geschlagen, so lassen sich hieran die verschiedenen Ansichten über die sogenannte Ausfüllung des blinden Fleckes veranschaulichen: 1) die Bilder in der Umgebung des Loches erscheinen so, als ob dasselbe durch Contraction seiner dehnbaren Umgebung zum Verschwinden gebracht worden wäre, wobei der unmittelbar angrenzende Theil der Kautschukplatte sammt den aufliegenden Farben (Empfindungen) am stärksten, die weitere Nachbarschaft weniger gedehnt wurde. 2) Die Bilder erscheinen so, als ob nur ein ganz schmaler Saum im Umkreis des Loches sammt seiner Farbe (Empfindung) so stark gezerrt worden wäre, dass dadurch das Loch geschlossen wurde, während die weitere Nachbarschaft des Loches gar nicht von der Dehnung betroffen wurde. 3) Das Loch

1 E. H. WEBER, Ber. d. sächs. Ges. d. Wiss. 1852. S. 149.
2 FICK, Arch. f. Anat. u. Physiol. 1853. S. 396.
3 VOLKMANN, Ber. d. sächs. Ges. d. Wiss. April 1853. S. 27.
4 HELMHOLTZ, Physiol. Optik S. 578.
5 FUNKE, Ber. d. naturf. Ges. z. Freiburg in Br. III. 3.

ist eigentlich immer vorhanden, aber unsere Phantasie füllt dasselbe so aus, wie es auf Grund der umgebenden Bilder am Einfachsten und Wahrscheinlichsten ist. 4) Man kann das Loch, obwohl es da ist, ebenso wenig sehen, wie die Peripherie der Kautschukplatte; auch ringsum hat das Sehfeld eine Grenze, aber wir sehen sie ebensowenig wie den Rand der Lücke, welche dem blinden Flecke entspricht.

DRITTES CAPITEL.

Der Horopter.

Auf Grundlage der im ersten Capitel empirisch festgestellten Anordnung der correspondirenden Punkte der beiden Netzhäute lässt sich für jede gegebene Augenstellung berechnen, welche Punkte des Aussenraumes in der Lage sind, sich auf Deckpunkten abzubilden, oder anders gesagt, in welchen Punkten des Aussenraumes sich correspondirende Richtungslinien schneiden. Man muss dabei freilich die empirisch gewonnenen Ergebnisse mehr oder weniger schematisiren und insbesondere auch annehmen, dass die, einem bestimmten Netzhautpunkte beim Sehen in die Ferne zugehörende Richtungslinie ihre Lage im Auge nicht ändert, wenn dasselbe sich für die Nähe accommodirt.

Denkt man sich durch die Gesichtslinie und den mittlen Längsschnitt der Netzhaut eine Ebene und in diese Ebene eine zur Gesichtslinie senkrechte Gerade gelegt, so lassen sich durch diese Gerade noch unendlich viele Ebenen legen, deren jede die Netzhaut in einem anderen Längsschnitte schneidet.

Dieses System von Ebenen stellt ein sogenanntes Ebenenbüschel dar. Jede dieser Ebenen heisse eine Längsschnittebene, und das ganze System das Büschel der Längsschnittebenen.

Analog denke man sich durch die Gesichtslinie und den mittlen Querschnitt der Netzhaut eine Ebene und in diese eine zur Gesichtslinie rechtwinklige Gerade gelegt. Jede andere durch diese Gerade gelegte Ebene schneidet die Netzhaut in einem andern Querschnitte und heisse eine Querschnittebene; die Gesammtheit aller möglichen Querschnittebenen heisse das Büschel der Querschnittebenen.

Bestimmt man bei einer gegebenen Augenstellung für zwei Längsschnittebenen, welche correspondirenden Längsschnitten entsprechen,

und deshalb correspondirende Längsschnittebenen heissen sollen, deren Durchschnittslinie im Aussenraume, so muss jeder Punkt dieser geraden Linie sich auf correspondirenden Längsschnitten abbilden, weil sich in ihm Richtungslinien durchschneiden, welche correspondirenden Längsschnitten der Netzhaut, wenn auch im Allgemeinen nicht correspondirenden Punkten dieser Längsschnitte angehören. Die Bilder eines in jener Geraden liegenden Punktes können also, wenn sie nicht im besonderen Falle auf Deckpunkten liegen, nur eine Längsdisparation haben.

Da jede zwei correspondirende Längsschnittebenen sich in einer solchen Geraden schneiden, so giebt es immer eine unendliche Zahl oder eine sogenannte Schaar solcher Geraden, welche in ihrer Gesammtheit eine Fläche darstellen, und zwar im Allgemeinen eine geradlinige Fläche zweiten Grades. Diese Fläche heisst der Längshoropter (Hering) oder Verticalhoropter (Helmholtz) deshalb, weil sie, soweit sie im binocularen Gesichtsraum liegt, die Gesammtheit derjenigen Aussenpunkte darstellt, welche bei der gegebenen Augenstellung sich auf correspondirenden Längsschnitten abbilden, und deren Bilder also nur Längsdisparation haben können, nicht aber quere Disparation.

In ganz analoger Weise stellt die Gesammtheit aller Geraden, in welchen sich je zwei correspondirende Querschnittebenen durchschneiden, im Allgemeinen eine geradlinige Fläche zweiten Grades dar, welche der Querhoropter oder Horizontalhoropter heisst, weil sie jeden Aussenpunkt enthält, der sich bei der gegebenen Augenstellung auf correspondirenden Querschnitten abbildet, dessen Bilder also nur quere Disparation haben.

Jede Gerade, welche im Längshoropter liegt, bildet sich auf correspondirenden Längsschnitten ab, und obwohl dabei die Bilder der einzelnen Punkte der Geraden nicht auf Deckpunkte fallen, so decken sich doch gleichsam die beiderseitigen Bilder im Ganzen, weil die Disparation der Bilder jedes Einzelpunktes in der Richtung des Linienbildes selbst stattfindet. Analoges gilt vom Querhoropter. Deshalb bezeichnete Helmholtz diese beiden Flächen auch als den verticalen und horizontalen Linienhoropter, während Hering sie Partialhoropter genannt hatte. Der fixirte Punkt gehört, da er sich auf Deckpunkten, also zugleich auf correspondirenden Längsschnitten und Querschnitten abbildet, sowohl dem Längs- als dem Querhoropter an. Ausserdem giebt es stets noch eine zusammenhängende Reihe von Punkten, von welchen dasselbe gilt, welche also den beiden Partial- oder Linearhoroptern gemeinsam sind, und

in der Durchschnittslinie dieser beiden Flächen gelegen sind. Die Gesammtheit dieser Punkte liegt, wie HERING und HELMHOLTZ zeigten, im Allgemeinen auf einer Curve doppelter Krümmung und dritten Grades. Sie heisst Punkthoropter (HELMHOLTZ) oder Totalhoropter (HERING), weil jeder in ihr und im binocularen Gesichtsraum gelegene Punkt sich auf Deckpunkten abbildet.

In besonderen Fällen hat der Durchschnitt der genannten beiden Linearhoroptoren eine einfachere Gestalt, und diese Grenzfälle sind von vorwiegendem Interesse, daher sie im Folgenden allein berücksichtigt werden.

Im Capitel über die Augenbewegungen wird gezeigt werden, dass unsere Augen, wenn die Kopfstellung zwanglos gewählt werden kann, sowohl beim Fern- als beim Nahsehen meist so gestellt sind, dass die queren Mittelschnitte beider Netzhäute genau oder sehr annähernd parallel gestellt sind. Unter dieser besonderen Bedingung ergeben sich für die verschiedenen Augenstellungen folgende Linear- und Punkthoropteren.

1. Der Horopter bei symmetrischer Parallelstellung der Gesichtslinien. Jede zwei correspondirende Querschnittebenen fallen zusammen, weil die Axen der beiden Büschel der Querschnittebenen zusammenfallen.

Der Querhoropter ist also der ganze binoculare Gesichtsraum.

In denjenigen Augen, deren mittle Längsschnitte rechtwinklig zu den mittlen Querschnitten sind, liegen jede zwei correspondirende Längsschnittebenen parallel, schneiden sich also in der Unendlichkeit. Der Längshoropter ist mathematisch genommen eine unendlich ferne zu den Gesichtslinien senkrechte Ebene, praktisch genommen der ganze über eine gewisse Entfernung hinaus gelegene Raum, weil minimale Abweichung zweier correspondirender Richtungslinien vom Parallelismus nicht in Betracht kommen kann.

Die genannte unendlich ferne Ebene ist zugleich der mathematische Punkthoropter. Praktisch genommen ist es der ganze über eine gewisse Entfernung hinaus gelegene, binocular sichtbare Raum.

Sind die mittlen Längsschnitte, wie in den meisten Augen, zu den mittlen Querschnitten in der oben erörterten Weise geneigt, so ist der Längshoropter eine in endlicher Entfernung unterhalb der Blickebene gelegene und mit dieser parallele Ebene; dieselbe ist, da sie auch dem Querhoropter angehört, zugleich der Punkthoropter. HELMHOLTZ giebt

an, dass für seine Augen diese Ebene mit der Horizontalebene des Fussbodens nahebei zusammenfällt, wenn seine Blickebene horizontal liegt.

2. Horopter bei symmetrischer Convergenz der Gesichtslinien. Jede zwei correspondirende Querschnittebenen schneiden sich in der Medianebene, die Ebenen der beiden mittlen Querschnitte fallen zusammen, und der Querhoropter besteht also aus der Medianebene und der Blickebene.

Für Augen, deren mittle Längsschnitte rechtwinklig zu den mittlen Querschnitten sind, schneiden sich je zwei correspondirende Längsschnittebenen in einer zur Blickebene senkrechten Geraden. Die Schaar dieser Geraden bildet einen zur Blickebene senkrechten Kreiscylinder, welcher durch den Blickpunkt und in seiner ausserhalb des binocularen Gesichtsraumes liegenden Fortsetzung durch die beiden Knotenpunkte der Richtungslinien geht. Dieser Cylinder ist der Längshoropter. Der Punkthoropter besteht aus dem in der Blickebene durch den Blickpunkt und beide Kreuzungspunkte der Richtungslinien gelegten Kreise, dem sogenannten MÜLLER'schen Horopterkreise, und aus einer zur Blickebene senkrechten Geraden, die auf dem Punkte des Kreises steht, in welchem derselbe die Medianebene durchschneidet, d. i. also hier zugleich der Blickpunkt.

Es ist bemerkenswerth, dass dieser Punkthoropter genau derselbe bleibt, auch wenn die Gesichtslinien unsymmetrisch convergiren, weil dabei auch der Längshoropter derselbe ist, und der Querhoropter aus der Blickebene und einer zu ihr senkrechten Ebene besteht, welche jetzt zwar mit der Medianebene einen Winkel einschliesst, dieselbe aber stets in der eben genannten Geraden des Punkthoropters schneidet.

Für Augen, deren mittle Längsschnitte nicht rechtwinklig zu den mittlen Querschnitten liegen, besteht der Querhoropter wieder aus der Blickebene und der Medianebene.

Der Längshoropter aber ist eine Kegelfläche, deren Spitze unterhalb der Blickebene liegt. Diese Kegelfläche durchschneidet die Blickebene in dem eben besprochenen, durch den Blickpunkt und beide Kreuzungspunkte gehenden Kreise, die Medianebene aber in einer durch den Blickpunkt gehenden Geraden, welche zur Blickebene derart geneigt ist, dass ihr oberer Theil dem Gesichte ferner liegt. Die Neigung derselben zur Blickebene ist um so stärker, je weiter der Blickpunkt von den Augen abliegt.

Dieser Kreis (MÜLLER'scher Kreis) und diese zur Blick-

ebene geneigte und durch den Blickpunkt gehende Gerade bilden also den Punkthoropter.

Im Hinblick auf das Folgende sei nur noch erwähnt, dass auch für Augen mit Netzhautincongruenz der Längshoropter zu einem senkrecht zur Blickebene stehenden, durch Blickpunkt und beide Knotenpunkte gehenden Kreiscylinder wird, so oft die mittlen Längsschnitte senkrecht zur Blickebene liegen. Die Blickebene gehört dann aber nicht zum Querhoropter, und der MÜLLER'sche Kreis nicht mehr zum Punkthoropter.

3. Der Meridianhoropter, Längshoropter und Querhoropter sind, wie wir sahen, geradlinige Flächen, welche dadurch charakterisirt sind, dass jede in ihnen gelegene Gerade sich auf correspondirenden Netzhautlinien abbildet. Derartige Flächen zweiten Grades, Partial- oder Linienhoropteren, giebt es aber noch unendlich viele; doch knüpft sich bis jetzt nur noch an eine derselben ein besonderes Interesse. Diese ist dadurch ausgezeichnet, dass jede in ihr gelegene Gerade sich auf correspondirenden Meridianen abbildet; sie heisst daher der Meridianhoropter (HERING).

Derselbe ist bei symmetrischer Convergenz der Gesichtslinien im Allgemeinen eine Kegelfläche (Doppelkegelmantel), deren Mittelpunkt (Spitze) im Blickpunkte liegt. Im besonderen Falle, wo correspondirende Meridiane in der Blickebene liegen, geht diese Fläche in zwei Ebenen über, deren eine für Augen ohne Netzhautincongruenz die Blickebene, die andere die im Blickpunkte senkrecht zur Blickebene und zur Medianebene stehende Ebene ist.

Die Aufgabe, auf Grund einer gegebenen Anordnung der Deckpunkte den Horopter zu bestimmen, ist eine rein mathematische, und ihre ausführliche Lösung darf deshalb hier übergangen werden. Eine allgemeine Auflösung des Problems mit Hülfe der STEINER'schen Geometrie hat HERING[1] gegeben, eine analytische HELMHOLTZ.[2] Von diesem mathematischen oder theoretischen Horopter hat man den empirischen Horopter unterschieden, d. i. den Inbegriff aller Stellen des binocularen Gesichtsraumes, an welchen bei gegebener Augenstellung kleine deutliche Objecte einfach, nicht in Doppelbildern, erscheinen. Vergleiche hierüber das Capitel über die Doppelbilder. Ueber den Versuch einer empirischen Bestimmung des Längshoropters nach anderer Methode vergleiche das Capitel über das Sehen mit disparaten Netzhautstellen.

1 HERING, Beiträge zur Physiologie IV. 1864.
2 HELMHOLTZ, Arch. f. Ophthalmologie X. 1. S. 1. 1864 und Physiol. Optik S. 745.

VIERTES CAPITEL.

Von der Prävalenz und dem Wettstreite der Conturen.

Wenn wir den Sternhimmel oder andere sehr ferne Dinge betrachten, so liegen die Bilder aller binocular gesehenen Objectpunkte genau oder sehr annähernd auf Deckstellen. Je zwei Deckstellen werden also in derselben Weise von Lichtstrahlen gereizt. Dies ist nicht mehr der Fall, wenn die Netzhäute Bilder von Dingen empfangen, welche nicht im Horopter liegen; dann können die Bilder zweier verschiedener Aussendinge auf Deckstellen fallen. Es ist also zu untersuchen, wie sich das räumliche Sehen verhält, wenn correspondirende Netzhauttheile verschieden gestaltete Bilder erhalten, wobei correspondirende Punkte dieser Theile verschieden gereizt werden.

Bei den im ersten Capitel beschriebenen haploskopischen Versuchen haben wir hierüber schon einige Erfahrungen gesammelt. Dabei boten wir z. B. dem linken Auge eine vom Mittelpunkte der ihm gegenüber liegenden Scheibe nach oben, dem rechten Auge in analoger Weise eine nach unten laufende schwarze Halblinie auf weissem Grunde. Den nicht durch Licht gereizten Netzhautstellen, auf welchen im einen Auge das Bild einer schwarzen Halblinie lag, gehörten im andern Auge Deckstellen zu, welche von weissem Lichte erregt wurden. Gleichwohl sahen wir beide Halblinien schwarz. Die Reizung derjenigen Netzhautstellen, auf deren zugehörigen Deckstellen im andern Auge das Bild der schwarzen Halblinie lag, löste also keine wahrnehmbare Empfindung aus, sondern blieb so zu sagen latent. Dasselbe würde der Fall gewesen sein, wenn wir die Halblinien beiderseits farbig auf andersfarbigem Grunde gemacht hätten.

Zeichnen wir auf die Mitte der linken Scheibe des Haploskops ein Sternchen und links davon den Buchstaben *A*, auf die Mitte der rechten Scheibe ein gleiches Sternchen, und rechts davon den Buchstaben *C*, wie es hier dargestellt ist,

A * * C

A * C

so sehen wir, wenn jede Gesichtslinie auf das Kreuzchen ihrer Seite eingestellt ist, beide Buchstaben nahe beisammen und dazwischen

ein einfaches Sternchen. Wer die nöthige Uebung hat, kann ohne Hülfe eines Haploskops seine Blicklinien auf die beiden Sternchen einstellen.

Wenn also auf correspondirenden Netzhauttheilen beiderseits ein Grund von derselben Farbe, auf der einen aber zugleich eine gut vom Grunde abstechende, mit nicht allzu breiten Strichen ausgeführte Figur irgend welcher Art sich abbildet, so sehen wir im Allgemeinen diese Figur ebenso deutlich, als wenn sie sich zugleich auf der andern Netzhaut in correspondirender Weise abbildete. Die dem Netzhautbilde der Figur correspondirenden Netzhautstellen des andern Auges lösen dabei keine deutlich wahrnehmbare Empfindung aus; vielmehr wird die ihnen entsprechende Empfindung, wie man zu sagen pflegt, unterdrückt. Hierauf beruht die Möglichkeit, die Correspondenz der Netzhäute nach der Methode der gegenseitigen Substitution derselben zu untersuchen.

Liegen auf der einen Scheibe des Haploskops weisse Striche oder Flecke auf schwarzem Grunde, während die andere Scheibe gleichmässig weiss ist, wie es die beiden äusseren Felder der Fig. 13

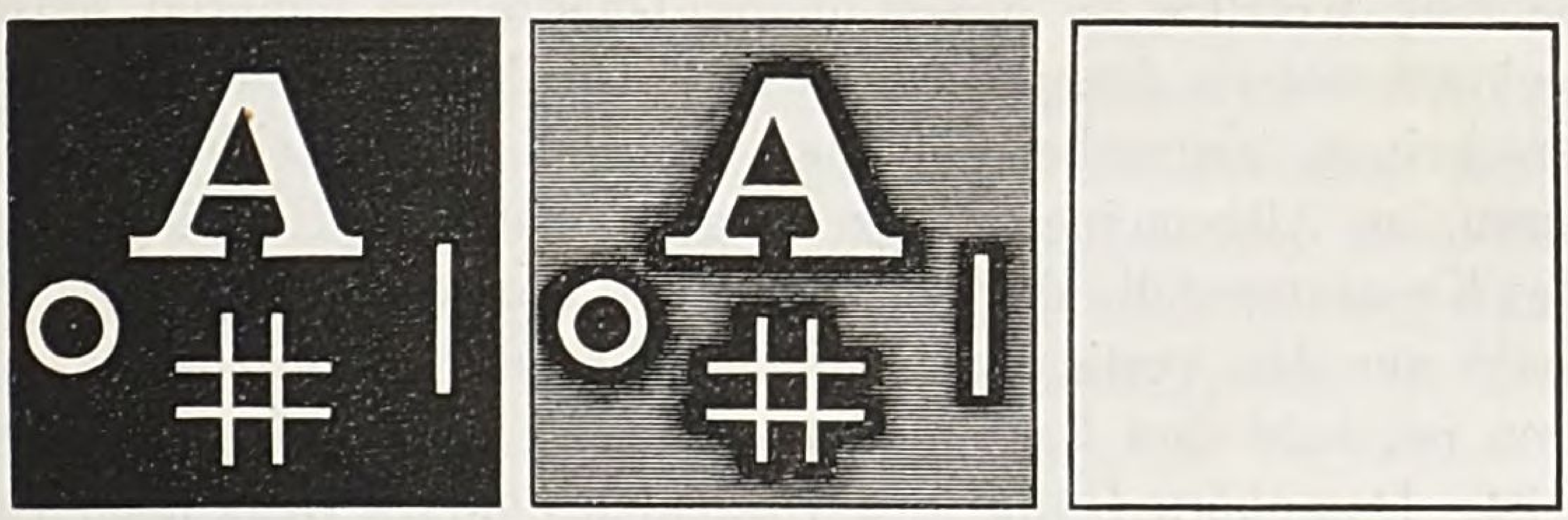


Fig. 13.

darstellen, so erscheint der Grund des Sehfeldes in einem schwankenden und meist glänzenden Grau, welches bald mehr ins Schwarze bald mehr ins Weisse übergeht, und auf diesem Grunde liegen dauernd weisse Figuren, jede rings umgeben von einem dauernd schwarzen Saume, welcher sich in das jeweilige Grau des Grundes abstuft, wie es das Mittelfeld der Fig. 13 darstellt.

Sind die linkseitigen Figuren farbig auf andersfarbigem Grunde, und hat die rechte Scheibe die Farbe der linkseitigen Figuren, so erscheinen diese dauernd in ihrer Farbe umgeben von einem Saume von der Farbe des linkseitigen Grundes, der übrige Grund aber in einer schwankenden Färbung; bald tritt hier die Farbe der einen, bald die der anderen Scheibe deutlicher hervor, bald zeigt sich eine Mischfarbe. Beide Farben liegen gleichsam mit einander im Kampfe. Die einseitig gesehenen Figuren aber bleiben stets sichtbar und um

sie herum wenigstens ein Saum ihres Grundes, welcher in keinen Wettstreit mit der Farbe der andern Seite eintritt, sondern dieselbe dauernd unterdrückt.

Färben wir die linke Hälfte der linken Scheibe des Haploskops schwarz, die rechte weiss, die obere Hälfte der rechten Scheibe schwarz und die untere weiss, wie es die beiden äussern Felder der Fig. 14 zeigen, so dass ein scharfer Contur beide Hälften trennt, so

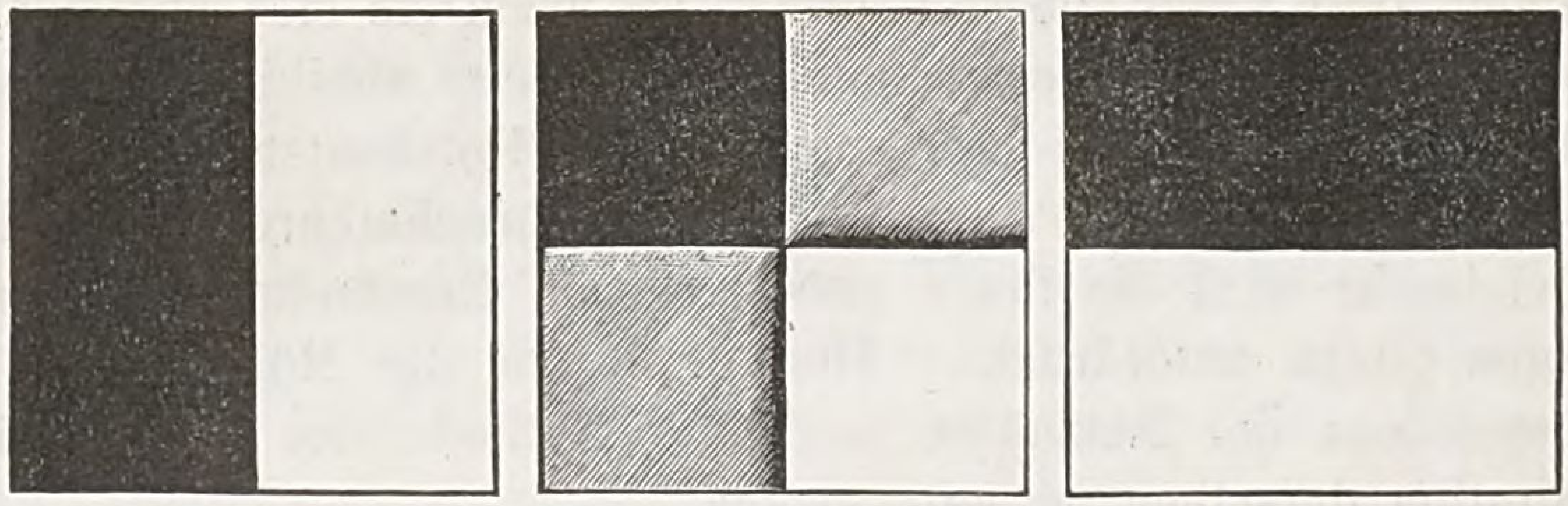


Fig. 14.

erscheint uns, wenn jede Gesichtslinie auf den Mittelpunkt der bezüglichen Scheibe gerichtet ist, und wir passend accommodirt sind, ein Sehfeld, welches im linken oberen Quadranten dauernd schwarz, im rechtern untern dauernd weiss ist. Die beiden andern Quadranten erscheinen, abgesehen von der unmittelbaren Nachbarschaft der Conturen, im Allgemeinen glänzend grau, bald dunkler, bald heller. An der Kreuzungsstelle des verticalen und horizontalen Conturs sehen wir bald nur den verticalen Contur, während der horizontale unterbrochen ist, bald den horizontalen, während der verticale unterbrochen ist. Der obern Hälfte des verticalen Conturs liegt nach rechts ein weisser, seiner untern nach links ein schwarzer Saum an, der allmählich in das Grau des bezüglichen Quadranten übergeht. Ebenso zeigt die linke Hälfte der horizontalen Grenzlinie nach unten einen dauernd weissen, die rechte Hälfte nach oben einen dauernd schwarzen Saum. Beide Conturen liegen an der Kreuzungsstelle gleichsam mit einander im Kampfe, bald siegt der eine mit dem ihm unmittelbar anliegenden Theile seines Grundes und durchbricht so den andern, bald ist das Umgekehrte der Fall. Dabei kämpfen auch in den beiden oben als grau bezeichneten Quadranten das Schwarz und Weiss mit einander, und geben bald eine hellere bald eine dunklere und meist glänzende Mischung. Das Mittelfeld der Fig. 14 zeigt eine bestimmte Phase dieses Wettstreites.

Ziehen wir durch die Mitte der linken weissen Scheibe des Haploskops einen mässig breiten schwarzen Verticalstrich, durch die Mitte der rechten ebenfalls weissen Scheibe einen Horizontalstrich,

und markiren den Mittelpunkt jeder Scheibe durch ein kleines weisses Kreuzchen, um der Gesichtslinie einen Haltpunkt zu geben, so erscheint uns im Sehfelde ein annähernd rechtwinkliges Kreuz, etwa wie *a*, *b*, *c* der Fig. 15. Die Mitte des Kreuzes, wo beide Schenkel sich decken,

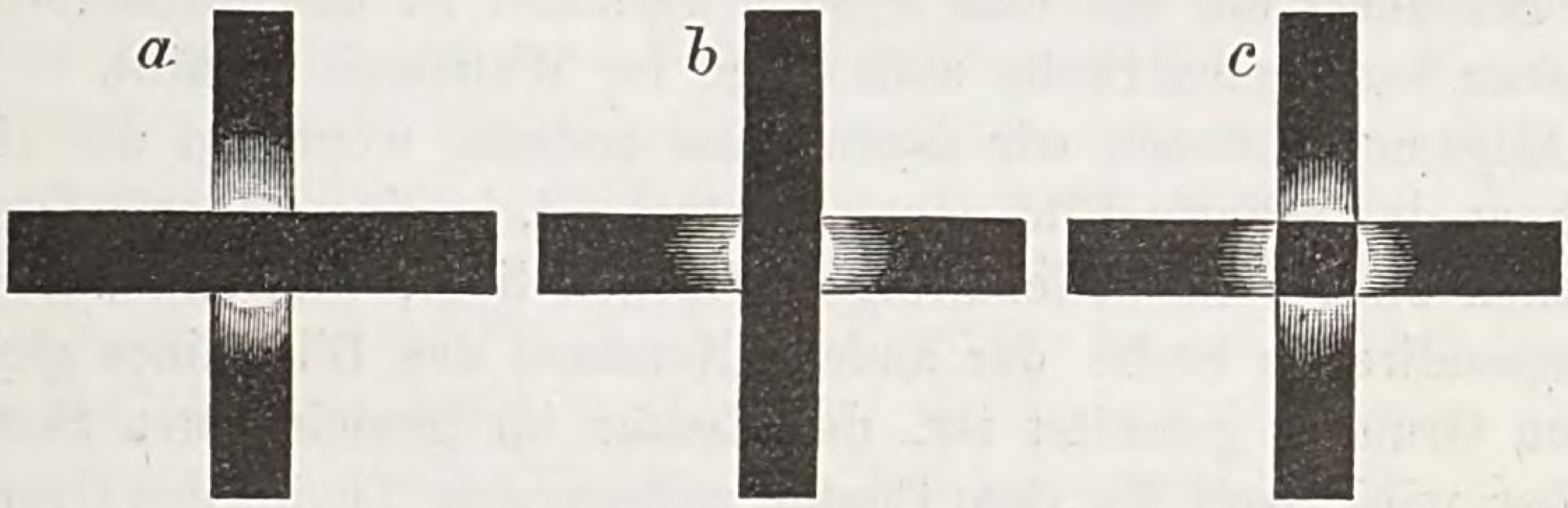


Fig. 15.

erscheint immer schwarz und hängt bald nur mit dem übrigen Schwarz des horizontalen Schenkels wie in *a*, bald nur mit dem des verticalen Schenkels, wie in *b*, bald mit keinem von beiden zusammen, wie in *c*. Die Unterbrechung des Zusammenhanges kommt dadurch zu Stande, dass an der Kreuzungsstelle am bezüglichen Contur des Schwarzen etwas Weiss vom Grunde gleichsam haften bleibt, welches in unmittelbarer Nähe des Conturs am hellsten ist und sich in das Schwarze des unterbrochenen Schenkels abschattirt. Bald erscheint der eine Strich unterbrochen, bald der andere, bald beide, so dass beide Schenkel an der Kreuzungsstelle gleichsam im Wettstreite mit einander sind; nie sehen wir ein in der Mitte zusammenhängendes Kreuz, wie es erscheinen würde, wenn beide Striche sich auf derselben Netzhaut abbildeten.

Liegt auf der linken Scheibe ein System paralleler Linien, auf der rechten ein System ebenfalls paralleler, aber anders gerichteter Linien, wie auf den beiden äussern Feldern der Fig. 16, so sieht man

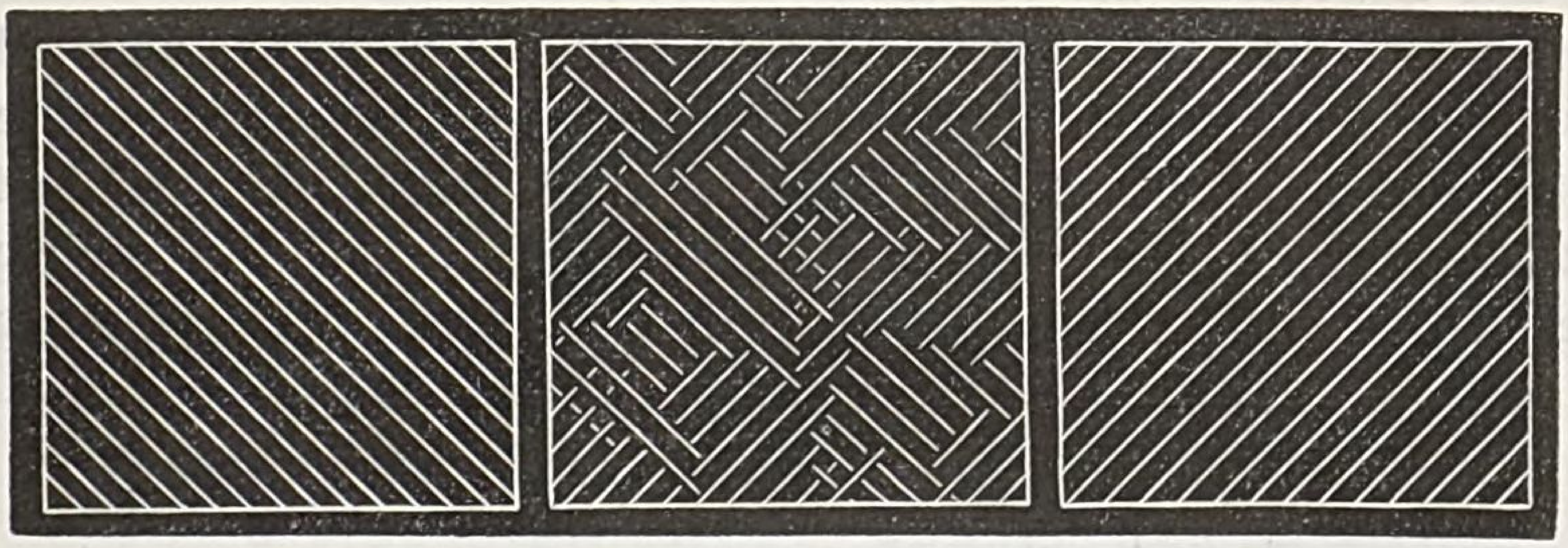


Fig. 16.

im Sehfelde allenthalben die Linien des einen Systems die des andern durchbrechen, wie es das Mittelfeld der Figur annähernd dar-

stellt. An der einen Stelle ist das eine System, an der andern das andere durchbrochen; an einer und derselben Stelle tritt bald das eine deutlich hervor, bald das andere, kurz es ist ein fortwährender unruhiger Wechsel wahrzunehmen, wenn nicht die Aufmerksamkeit ganz besonders auf das eine System gerichtet ist und demselben an der eben beachteten Stelle zum Siege im Wettstreit verhilft.

Allgemein können wir sagen, dass erstens, wenn auf der einen Netzhaut das scharfe Bild eines Conturs, d. i. eine scharfe Grenze zwischen zwei verschiedenfarbigen Flächen liegt, während über die correspondirende Stelle der andern Netzhaut das Bild eines gleichartigen Grundes gebreitet ist, der Contur im gemeinsamen Sehfeld sichtbar wird, weil die dem Contur anliegenden Theile des Grundes über die entsprechenden Theile des andern Netzhautbildes den Sieg davon tragen, und die denselben entsprechende Empfindung gleichsam unterdrücken. Jeder Contur des einen Netzhautbildes verhilft dem ihm anliegenden Theile des Grundes zum dauernden Siege über den andersfarbigen Grund des andern Netzhautbildes. Man kann dies die Prävalenz der Conturen nennen. Zweitens ist zu sagen, dass wenn in beiden Netzhautbildern Conturen so verlaufen, dass sie nur mit je einem Punkt auf Deckstellen liegen, sie sich an der diesem Deckstellenpaar entsprechenden Stelle des Sehfeldes zwar zu durchkreuzen scheinen, aber immer derart, dass bald der eine Contur mittels der ihn umsäumenden Theile seines Grundes den andern unterbricht, bald wieder dieser den ersten. Man nennt dies den Wettstreit (Wetteifern, Panum) der Conturen.

Die Prävalenz und der Wettstreit der Conturen wurde zuerst von H. Meyer [1] und nachher ausführlicher von Panum [2] erörtert, deren Abhandlungen auch obige Figuren im Wesentlichen entlehnt sind. Vergl. ausserdem Welcker [3], Fechner [4] und Helmholtz. [5]

Die Bedeutung der Prävalenz der Conturen und ihres Wettstreites liegt darin[6], dass durch sie „die Fusion beider Netzhautbilder verhindert, und jedem derselben eine gewisse Selbständigkeit gewahrt wird". Wenn wir mit einem Auge durch ein unbelegtes verticales Spiegelglas sehen, welches unter 45^0 zur Gesichtslinie geneigt ist, so erscheinen uns die direct und die durch Spiegelung ge-

1 H. Meyer, Arch. f. Ophthalmologie II. 2. S. 77.
2 Panum, Physiol. Untersuchungen über das Sehen mit zwei Augen 1858.
3 Welcker, Ueber Irradiation 1852.
4 Fechner, Ueber einige Verhältnisse des binocularen Sehens. Ber. d. sächs. Ges. d. Wiss. VII. S. 378.
5 Helmholtz, Physiol. Optik S. 766.
6 Hering, Beiträge zur Physiologie V. S. 313.

sehenen Dinge in demselben Raume durch einander geschoben. Wir wissen dann zwar die Conturen der direct gesehenen von denen der gespiegelten Dinge meist zu sondern, aber dieselben Mischfarben füllen die Conturen beider aus, und mancherlei Täuschungen können dabei vorkommen. Dem gänzlich Unerfahrenen müssten nothwendig beide Bilder in eines zusammenfliessen. Setzen wir dagegen das Spiegelbild durch kleine Drehungen des Spiegelglases in Bewegung, so wird die Sonderung beider Bilder sehr erleichtert, weil dann das, was sich gemeinsam verschiebt, als zusammengehörig erkannt wird.

Bestände keine Prävalenz der Conturen und kein Wettstreit weder des Grundes noch der Conturen, und gäben verschieden gereizte Deckstellenpaare eine stetige, aus den beiderseitigen Erregungen resultirende Empfindung in derselben Weise, wie sie es bei beiderseits gleicher Reizung thun, so würden verschieden gestaltete und gefärbte Bilder beider Netzhäute bei ruhendem Blicke in ganz derselben Weise in Eines zusammenfliessen, wie bei festgehaltenem Spiegel die Bilder der direct gesehenen und der gespiegelten Dinge. Durch Schwankungen der Convergenz der Gesichtslinien wird die Sonderung der beiderseitigen Bilder noch weiter unterstützt in ähnlicher Weise wie bei dem obigen Versuche durch die Bewegung des Spiegels.

Panum [1] meint, „dass die Conturen die Retina besonders stark reizen, und dass die Nervenerregung, die durch sie hervorgebracht wird, eine andere und weit kräftiger ist, als diejenige, welche durch eine gleichmässig erleuchtete Fläche gesetzt wird.“ H. Meyer und Helmholtz dagegen geben eine psychologische Erklärung und meinen, dass die Conturen prävaliren, weil sich ihnen die Aufmerksamkeit zuwendet, und dass im Wettstreit der Conturen immer derjenige Contur siege, welcher eben Gegenstand der Aufmerksamkeit ist. In ausführlicher Weise hat besonders Fechner [2] den Einfluss der Aufmerksamkeit auf diese Erscheinungen auseinandergesetzt, ohne übrigens dieselben lediglich hieraus erklären zu wollen.

1 Panum, l. c. S. 47.
2 Fechner, l. c. S. 392.

FÜNFTES CAPITEL.

Das Gesetz der identischen Sehrichtungen.

Man stelle sich in etwa ½ Mtr. Entfernung vor ein Fenster, das eine freie Aussicht gewährt, fixire den Kopf mit einem Kopfhalter, wie ihn die Photographen benützen, schliesse zunächst das rechte Auge und suche mit dem linken einen etwas nach rechts gelegenen fernen Gegenstand auf, der sich gut von seiner Umgebung abhebt, z. B. einen einzelnen Baum. Während man ihn mit dem linken Auge fixirt, mache man auf die Fensterscheibe einen schwarzen Punkt derart, dass er dem linken Auge die Mitte des Baumes verdeckt. Nun schliesse man das linke und öffne das rechte Auge, richte letzteres auf den schwarzen Punkt der Fensterscheibe und beachte, welches Object des Aussenraumes er jetzt dem rechten Auge theilweise verdeckt. Dieses Object, es sei z. B. eine Esse, merke man sich. Schliesslich fixire man den Punkt auf der Scheibe mit beiden Augen und man wird gerade hinter demselben, von ihm theilweise gedeckt, zugleich den fernen Baum und die ferne Esse sehen, bald deutlicher den Baum, bald die Esse, bald beide, je nachdem im Wettstreite das Bild des einen oder des andern Auges siegt. Man sieht also den Punkt auf der Scheibe, den Baum und die Esse in derselben Richtung. Befindet sich der Punkt in der Medianebene des Kopfes und convergiren daher die Augen symmetrisch, so scheinen Punkt, Baum und Esse in der Medianebene zu liegen, obwohl letztere beide sich in Wirklichkeit ganz wo anders befinden.

Fig. 17. versinnlicht die Einrichtung des Versuches; *ff* ist die Fensterscheibe, *p* der fixirte schwarze Punkt; auf der linken Gesichtslinie *lb* liegt der ferne Baum, auf der rechten *re* die ferne Esse. Die Bilder von *b* und *e* fallen also ebenso wie das Bild von *p* auf die Stelle des directen Sehens und daher auf correspondirende Theile beider Netzhäute; die ganz gleichen Bilder von *p* liegen genau correspondirend, die ganz verschiedenen des Baumes und der Esse befinden sich nur auf correspondirenden Netzhautgegenden.

Der Versuch zeigt, dass Objecte, welche auf einer der beiden gekreuzten Gesichtslinien und also in ganz verschiedener Richtung vom Kopfe liegen, gleichwohl in einer und derselben Richtung erscheinen, und sich, wenn sie zugleich in verschiedenen Entfernungen

gesehen werden, zwar nicht dem Orte nach, wohl aber wenigstens der Richtung nach decken; ferner, dass sie, wenn bei Primärstellung des Kopfes die Gesichtslinien horizontal symmetrisch gekreuzt sind,

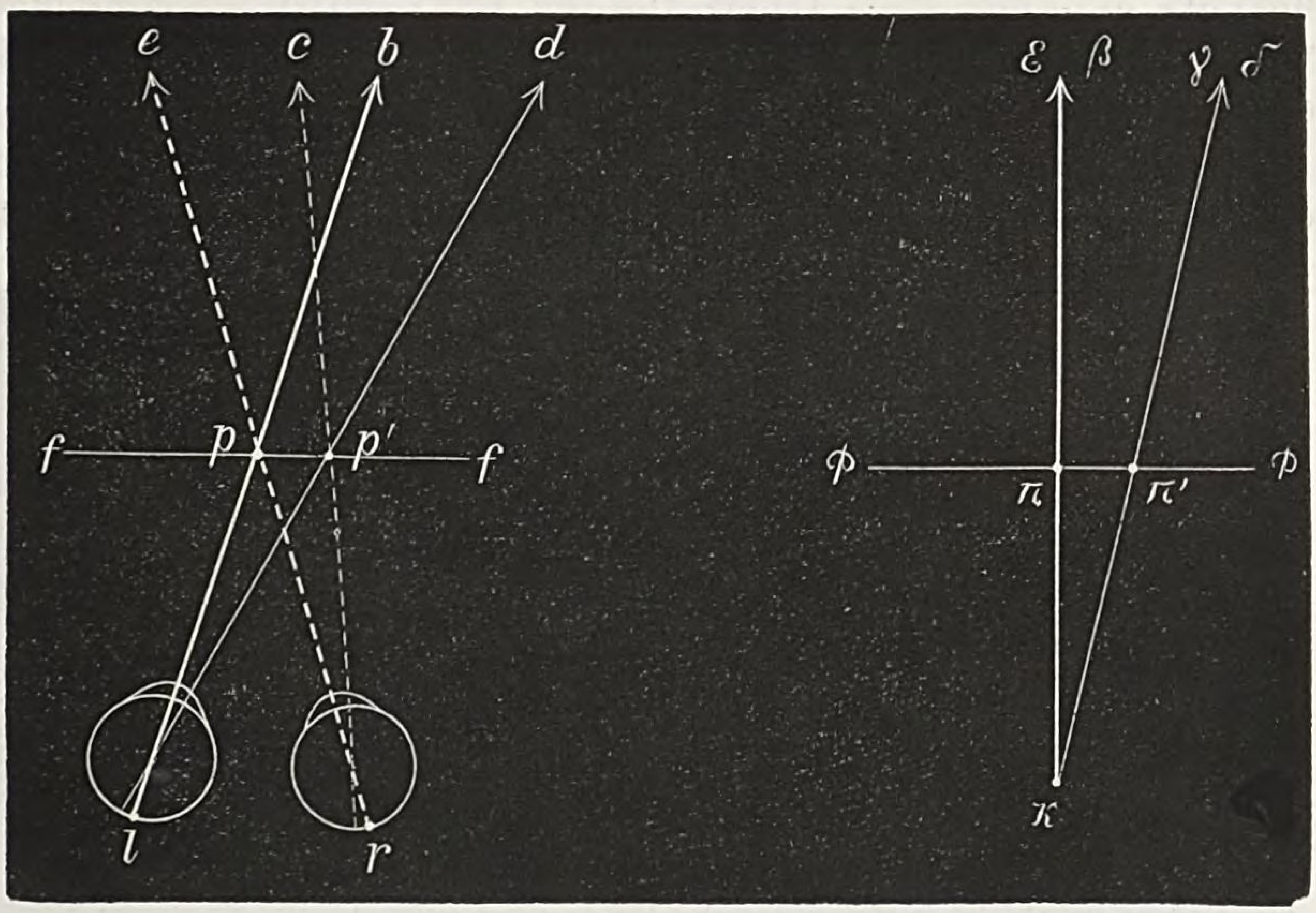


Fig. 17.

sämmtlich auf der scheinbaren Medianlinie als der Durchschnittslinie zwischen der scheinbaren Medianebene und der scheinbaren primären Blickebene zu liegen scheinen. Die Linie, in welcher Alles auf der Stelle des directen Sehens Abgebildete erscheint, heisst die gemeinsame Sehrichtungslinie oder kurz Sehrichtung der Netzhautcentren oder die Hauptsehrichtung.

Liegt mehr nach rechts vom fixirten Punkt p ein zweiter schwarzer Punkt p' auf der Fensterscheibe, so befindet sich derselbe sehr angenähert im Längshoropter und bildet sich ebenfalls nahezu auf correspondirenden Stellen ab. Die fernen Aussenobjecte (c und d in Fig. 17), welche auf den beiden zum Punkte p' gehörigen Richtungslinien liegen, erscheinen uns ebenfalls in derselben Richtung, wie der Punkt p' nämlich hinter diesem in der Ferne zu liegen. Den beiden correspondirenden Punkten, welche das Bild von p' empfangen, entspricht also abermals eine und dieselbe Sehrichtungslinie oder Sehrichtung, welche nach rechts von der scheinbaren Medianebene abweicht. Die Anordnung der Sehdinge ist daher im Sehraum etwa so, wie es Fig. 17 rechterseits darstellt. Alles erscheint in der scheinbaren Blickebene; dem wirklichen Punkte p entspricht der Sehpunkt

π, gerade dahinter auf der scheinbaren Medianlinie liegen in der Ferne die den wirklichen Dingen e und b entsprechenden Sehdinge ε und β. Der wirkliche Punkt p' erscheint als Punkt π' im Sehraume, dahinter auf einer nach rechts von der scheinbaren Medianlinie abweichenden Sehrichtungslinie die den wirklichen Dingen c und d entsprechenden Sehdinge γ und δ.

Man stelle sich wieder wie vorhin vor das Fenster, fixire einen entfernten, in der Medianebene gelegenen Gegenstand (a Fig. 18),

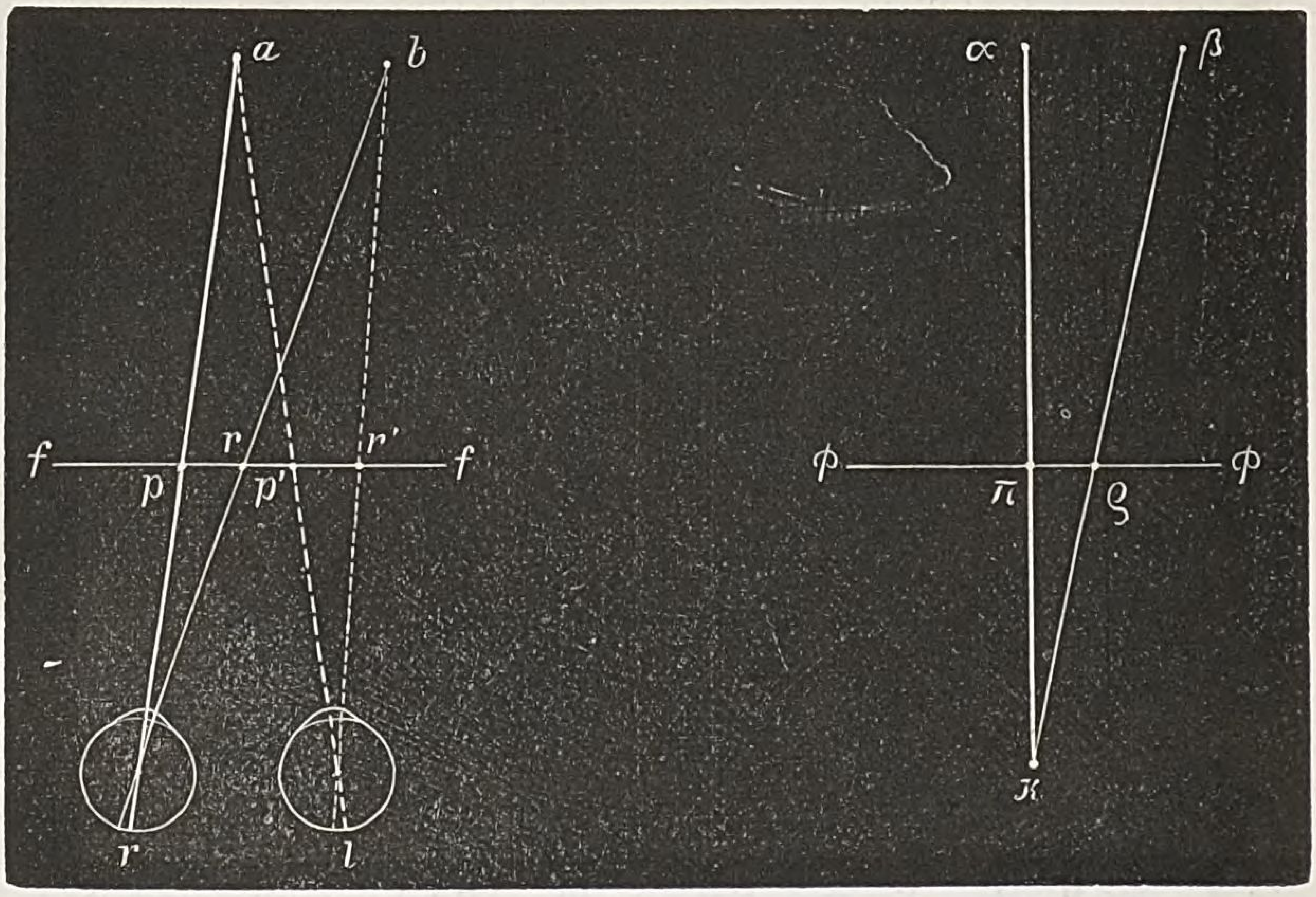


Fig. 18.

schliesse das linke Auge und bringe auf der Glasscheibe einen rothen Punkt (p) so an, dass er dem linken Auge eine Stelle des fixirten fernen Objectes verdeckt und also mit ihm in gleicher Richtung erscheint. Hierauf schliesse man das linke Auge, öffne das rechte und markire wieder, aber mit blauer Farbe denjenigen Punkt (p') auf der Scheibe, welcher jetzt in derselben Richtung wie das fixirte Object (a) erscheint. Fixirt man nun letzteres binocular, so sieht man das dem Objecte a entsprechende Sehding α wieder in der scheinbaren Medianebene und gerade davor auf der Scheibe einen Punkt π, welcher bald roth, bald blau aussieht, weil er durch die scheinbare Deckung der wirklichen Punkte p und p' entstanden ist.

Mehr rechts vom fernen fixirten Objecte a liege ein anderes ungefähr gleich fernes Object b. Während man mit dem linken Auge allein fixirt, bringe man wieder auf die Scheibe einen rothen Punkt

(r) da an, wo die Scheibe von der Richtungslinie des Objectes b geschnitten wird; ebenso, während a nun vom rechten Auge fixirt wird, einen blauen Punkt r' an der Stelle, wo jetzt die Richtungslinie von b die Scheibe schneidet. Endlich fixire man a binokular und man wird nun nicht nur in der Richtung von a sondern auch in der Richtung von b einen Punkt ϱ auf der Scheibe sehen, welcher bald roth, bald blau aussieht und also durch scheinbare Verschmelzung der wirklichen Punkte r und r' entstanden ist. Die Anordnung der Sehdinge im Sehraum ist jetzt etwa so, wie es Fig. 18 rechterseits darstellt. Wieder liegt das auf beiden Netzhautcentren Abgebildete nämlich p und a auf der scheinbaren Medianlinie des Sehraums in π und α, und ebenso erscheinen das Object b, die Punkte r und r' auf einer und derselben nach rechts von der scheinbaren Medianlinie abweichenden Sehrichtungslinie in β und ϱ.

Für den letztbeschriebenen Versuch kann man, während man immer das in der Medianebene liegende Object a fixirt, statt des indirect gesehenen Objectes b einen beliebigen anderen indirect gesehenen gleich fernen Gegenstand benützen und so für jedes beliebige Deckstellenpaar beweisen, dass die Sehdinge, welche den auf diesen Deckstellen gelegenen Bildern entsprechen und in verschiedener Entfernung gesehen werden, auf einer und derselben Sehrichtungslinie im Sehraume erscheinen.

Je zwei bestimmten correspondirenden Richtungslinien oder Visirlinien entspricht also im Sehraume eine einfache Sehrichtungslinie derart, dass auf letzterer alles das *erscheint*, was auf den ersteren *wirklich liegt*.

Was immer sich bei einer gegebenen Augenstellung auf den mittlen Querschnitten abbildet, erscheint in einer Ebene, welche den ganzen Sehraum in eine obere und eine untere Hälfte theilt und die *mittle Querebene des Sehraumes* heissen soll. Diese Ebene fällt bei horizontal symmetrischer Convergenz der Augen und Primärstellung des Kopfes mit der scheinbaren horizontalen Hauptebene zusammen. Was auf den beiden mittlen Längsschnitten abgebildet ist, erscheint in einer Ebene, welche den ganzen Sehraum in eine rechte und linke Hälfte theilt und die *mittle Längsebene des Sehraumes* heissen soll. Diese Ebene fällt bei Primärstellung des Kopfes und symmetrischer Stellung der Gesichtslinien mit der scheinbaren Medianebene zusammen. Auf der Durchschnittslinie der mittlen Längsebene und der mittlen Querebene des Sehraumes erscheint alles, was auf den Netzhautmitten abgebildet ist.

Da wir die Lage der Dinge auf unsern Körper und insbeson-

dere auf unsern Kopf beziehen, und dieser daher den Ausgangspunkt der Richtungen bildet, in welchen uns die Dinge erscheinen, so müssen wir uns sämmtliche Sehrichtungslinien, deren jede einem Deckstellenpaare entspricht, vom Kopfe aus divergirend denken, genauer gesagt von der Stelle aus, an welcher wir uns, bezogen auf die Sehdinge, unsern Kopf vorstellen. Dieser bildet also das Centrum der Sehrichtungen oder Sehrichtungslinien. Die Lage einer bestimmten Sehrichtungslinie im Sehraume ist bestimmt durch den scheinbaren Winkel, welchen sie einerseits mit der mittlen Querebene, anderseits mit der mittlen Längsebene einschliesst, und die Grösse dieses Winkels wächst mit dem Abstande des, dieser Sehrichtungslinie entsprechenden Deckstellenpaares vom mittlen Querschnitt beziehungsweise mittlen Längsschnitt der Netzhaut.

Sehen wir ab von der oben beschriebenen kleinen Incongruenz der Netzhäute, so können wir uns das Richtungslinienbüschel des rechten Auges mit dem des linken so zusammengelegt denken, dass je zwei correspondirende Richtungslinien zusammenfallen. Das Centrum des so entstandenen einfachen Linienbüschels denken wir uns in die Mitte zwischen beide Augen gelegt, so dass alle den mittlen Längsschnitten der Netzhäute zugehörigen Linien des Büschels in der Medianebene des Kopfes liegen. Dann würde dieses einfache Linienbüschel die Gesammtheit aller Sehrichtungslinien ungefähr darstellen. Handelt es sich nur um das Sehen ferner Objecte, so kann man sich das Centrum der Sehrichtungen besser in der Längsaxe des Kopfes auf gleicher Höhe mit den Augen gelegen denken.

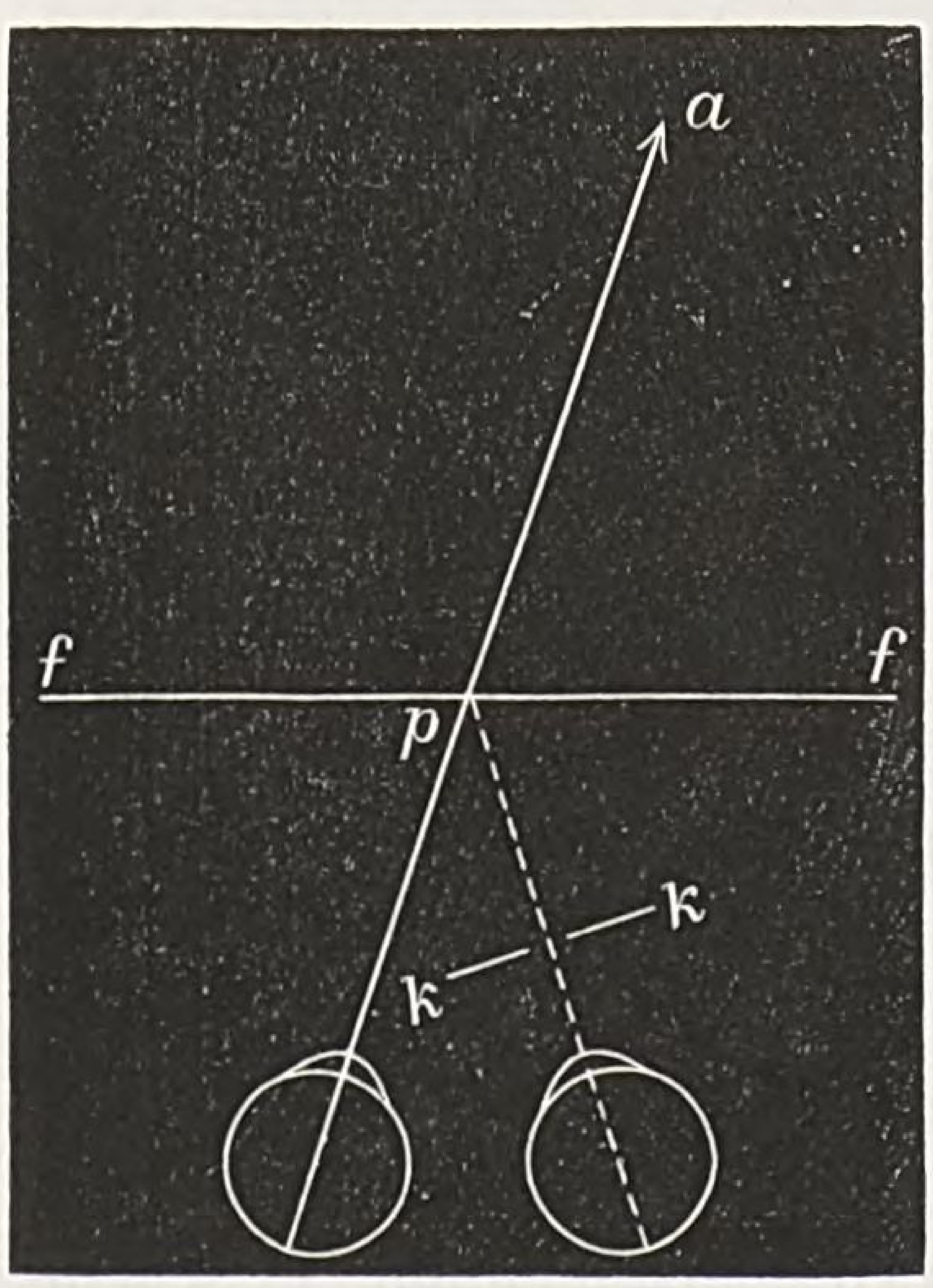


Fig. 19.

Auch beim einäugigen Sehen bleiben die Sehrichtungen in der Regel dieselben. Man fixire z. B. einen schwarzen Punkt *p* (Fig. 19) auf der Fensterscheibe *ff*, während man vor das eine Auge und einige Zoll von ihm entfernt ein grosses Kartenblatt *kk* mit einem äusserst feinen Loche hält, so dass man das Loch als einen kleinen Zerstreuungskreis und in der Mitte des letzteren den Punkt *p*, wenn auch etwas undeutlich sieht. Auf der Gesichtslinie des linken Auges befinde sich in der Ferne das Object *a*.

Obwohl man nun weiss, dass dasselbe nur mit dem linken Auge gesehen wird und also nach rechts von der Medianebene des Kopfes liegen muss, so sieht man es doch gerade aus hinter dem Punkte *p* in der scheinbaren Medianebene. Ebenso erscheinen dabei alle andern durch das Fenster sichtbaren Dinge auf der ihnen zukommenden Sehrichtungslinie und daher sämmtlich an einem falschen Orte. Das rechte Auge sieht hierbei gar nichts als den Punkt *p* und den kleinen Zerstreuungskreis des Loches, welcher sich wie ein Nebel über das Wenige legt, was das rechte Auge sonst noch durch das Loch hindurch sehen könnte, so dass auch dies Wenige kaum erkennbar und nicht störend wird. Verdeckt man das rechte Auge vollständig, so ändert sich zunächst nichts. Nur wenn man über die wirkliche Lage der Dinge reflectirt und das verdeckte Auge seine Stellung ändert, kann eine Aenderung in der scheinbaren Richtung der Dinge eintreten.

Anders verhält sich die Lage des Sehrichtungsbüschels zum Kopfe bei denen, welche einäugig sind oder sich, wie Mikroskopiker, gewöhnt haben, häufig nur das eine Auge zu benutzen, oder bei Menschen mit habitueller falscher Kopfhaltung. Wer überhaupt einäugig ist oder oft einäugig sieht, ist nicht den groben Täuschungen ausgesetzt, wie der ganz normal Doppeläugige. Bei alledem aber wird an dem wesentlichen Inhalte des Gesetzes der identischen Sehrichtungen nichts geändert: immer erscheint, sobald beide Augen sehen, das correspondirend Abgebildete auf einer und derselben Sehrichtungslinie; nur die Lage des ganzen Sehrichtungsbüschels zu den scheinbaren Hauptebenen des Raumes kann eine andere werden.

J. von Kries [1], bei welchem unter gewissen Bedingungen unwillkürliches Divergenzschielen eintritt, hat an sich selbst beobachtet, dass bei Divergenzstellungen seiner Augen zwar die auf correspondirenden Punkten sich abbildenden Gegenstände stets zusammenzufallen scheinen, dass aber in ganz ähnlicher Weise mit dem hierbei auftretenden Wettstreite der Sehfelder auch ein Wettstreit der Sehrichtungen eintritt. v. Kries, obwohl er binocular fixiren kann, pflegt für die Nähe vorzugsweise das linke, für die Ferne vorzugsweise das rechte Auge zu benutzen und das andere abweichen zu lassen. Infolge dessen hat er gelernt, beim Gebrauche des linken Auges die Dinge so zu sehen, wie wenn das Centrum der Sehrichtungslinien weiter nach links, beim Gebrauche des rechten Auges so, wie wenn es weiter nach rechts im Kopfe läge, als beim normalen doppeläugigen Sehen der Fall ist. Er ist gleichsam ein doppelter Einäugiger, und unter Umständen gerathen seine beiden Arten der Localisirung in Conflict, ohne dass das Gesetz der identischen Sehrichtungen dadurch alterirt wird.

1 v. Kries, Arch. f. Ophthalmologie XXIV. 4. Abth. S. 117.

Die Anordnung der Sehrichtungen im Sehraume wurde zuerst von Hering [1] ausführlich dargelegt, ungefähr gleichzeitig und unabhängig davon auch von Towne [2] gefunden, aber erst später öffentlich mitgetheilt. Die Grundzüge des Gesetzes der Sehrichtungen finden sich schon bei Joh. Müller [3] u. A. Prévost. [4]

Denkt man sich statt zweier Augen ein in der Mitte zwischen den beiden wirklichen Augen gelegenes Auge, und die Netzhautbilder beider wirklichen Augen auf die Netzhaut dieses Mittelauges so übertragen, dass sie in Beziehung zum verticalen und horizontalen Mittelschnitt dieser Netzhaut ebenso angeordnet sind, wie auf jeder Netzhaut in Beziehung zum mittlen Längsschnitt und mittlen Querschnitt, so würden die Richtungslinien dieses imaginären Einauges annähernd die Sehrichtungen sein. Dieses imaginäre Einauge hat man auch das Cyclopenauge genannt.

SECHSTES CAPITEL.

Das Sehen mit disparaten Stellen.

Gleichviel, ob die Ergebnisse der bisher vorliegenden Untersuchungen über die Anordnung der correspondirenden Stellen der Wahrheit mehr oder weniger nahe kommen, immer wird sich ergeben müssen, dass insbesondere bei Convergenz der Gesichtslinien nur verhältnissmässig wenige Punkte des Aussenraumes in der Lage sind, sich auf Deckstellen abzubilden. Es fragt sich nun, wie die räumlichen Eigenschaften der von einem Netzhautstellenpaar ausgelösten Empfindungen sich verhalten, je nachdem dieses Stellenpaar ein correspondirendes oder disparates ist.

Zur Untersuchung dieser Frage bieten sich zwei verschiedene Wege. Man kann erstens, während ein bestimmter Aussenpunkt fixirt wird, andere Punkte oder ausgedehnte Objecte von einfacher Form in verschiedene Lagen bringen, so dass sie sich bald auf correspondirenden, bald auf disparaten Stellen abbilden müssen, während man dabei ihre scheinbare Lage mit der scheinbaren Lage des fixirten

1 Hering, Beiträge zur Physiologie I. 1861 und II. § 63—69, woselbst das Wesen der Sehrichtungen ausführlicher erörtert und insbesondere gezeigt wird, dass die Lage des hinzugedachten Ausgangspunktes der Sehrichtungslinien eine variable ist und dass man sich denselben sogar manchmal hinter dem Kopfe zu denken hat.

2 Towne, nach einer brieflichen Mittheilung an Helmholtz (Physiol. Optik S. 745).

3 Joh. Müller, Handb. d. Physiologie II. S. 376. 1840.

4 Prévost, Essai sur la théorie de la vision binocul. Genève 1843.

Zs f Ps
X/226

Punktes vergleicht. Oder man kann die Untersuchung nach der haploskopischen Methode anstellen.

Denkt man sich, während ein bestimmter Punkt eines Aussendinges fixirt wird, durch jede Gesichtslinie eine zu derselben rechtwinklige Ebene, beiderseits in derselben Entfernung vom Auge, gelegt und alle übrigen Punkte des Dinges mittels der Richtungslinien auf diese Ebene projicirt, so würden diese Projectionen beiden Augen in räumlicher Beziehung dasselbe Netzhautbild geben, wie das Object selbst. Brächte man die beiden projectivischen Zeichnungen auf die beiden Scheiben des oben beschriebenen Haploskops in derselben Entfernung von den Augen, welche zuvor die Projectionsebenen hatten, und stellte jede Gesichtslinie auf den Punkt ein, welcher dem zuvor fixirten Aussenpunkt entspricht, so würden beide Netzhäute dasselbe Bild empfangen, wie beim Sehen des wirklichen Objectes, und die Bilder würden auf beiden Netzhäuten auch wieder dieselbe Lage haben, wenn beide Zeichnungen so gestellt wären, dass z. B. auf den mittlen Querschnitten der Netzhäute wieder die Bilder derselben Punkte lägen wie zuvor.

Zwischen dem Sehen des wirklichen Dinges und dem haploskopischen Sehen seiner beiden Projectionen bliebe dann nur noch der wesentliche Unterschied, dass bei ersterem die Gesichtslinien convergent, bei letzterem parallel sind, was zugleich einen verschiedenen Accommodationszustand mit sich bringt.

Aber auch dieser Unterschied lässt sich durch eine Modification des Haploskopes beseitigen, wie sie Fig. 20 schematisch darstellt.[1] Vor jeder der beiden horizontalen und zunächst parallel angenommenen Gesichtslinien befindet sich ein um 45° zu ihr geneigter kleiner Spiegel. Die beiden projectivischen Zeichnungen liegen je auf einer verticalen Ebene *a b c*, *a' b' c'* welche ebenfalls unter 45° zur Ebene des zugehörigen Spiegels geneigt ist und demselben auf einem Schlitten beliebig genähert oder wieder von ihm entfernt werden kann. Spiegel und Bildebene einer Seite sind auf je einem Gestell befestigt, welches um eine verticale Axe drehbar ist, deren gedachte Verlängerung durch den Drehpunkt des bezüglichen Auges geht. Bei der Drehung des Gestelles ändert sich also weder die Lage der Zeichnung zum Spiegel, noch die Lage des letzteren zum Drehpunkt des Auges, wenn der Kopf durch einen Halter fixirt ist. Sind *b* und *b'*

1 Dieser Apparat unterscheidet sich von dem beweglichen Spiegelstereoskope Wheatstone's nur dadurch, dass bei letzterem beide Spiegel sammt den zugehörigen Bildebenen um eine gemeinschaftliche zwischen den beiden Spiegeln gelegene verticale Axe drehbar sind, während im ersteren jeder Spiegel seine besondere, zugleich durch den Drehpunkt des entsprechenden Auges gehende Axe hat.

die dem Fixationspunkte entsprechenden Punkte der beiden Zeichnungen, so müssen die Gesichtslinien, wenn der Apparat die durch Fig. 20 versinnlichte Stellung hat, parallel stehen, um auf die Spiegelbilder β, β' dieser Punkte zu treffen; hat aber der Apparat eine Stellung, wie sie Fig. 21 darstellt, so müssen die Gesichtslinien zu demselben Zwecke convergiren. Dabei ändert sich also zwar die Augenstellung, nicht aber das Bild auf der Netzhaut, sofern die mittlen Längsschnitte und Querschnitte wieder dieselbe Lage zur Blickebene haben und nicht etwa mit der veränderten Accommodation der Augen zugleich die Anordnung der correspondirenden Richtungslinien sich geändert hat.

Fig. 20.

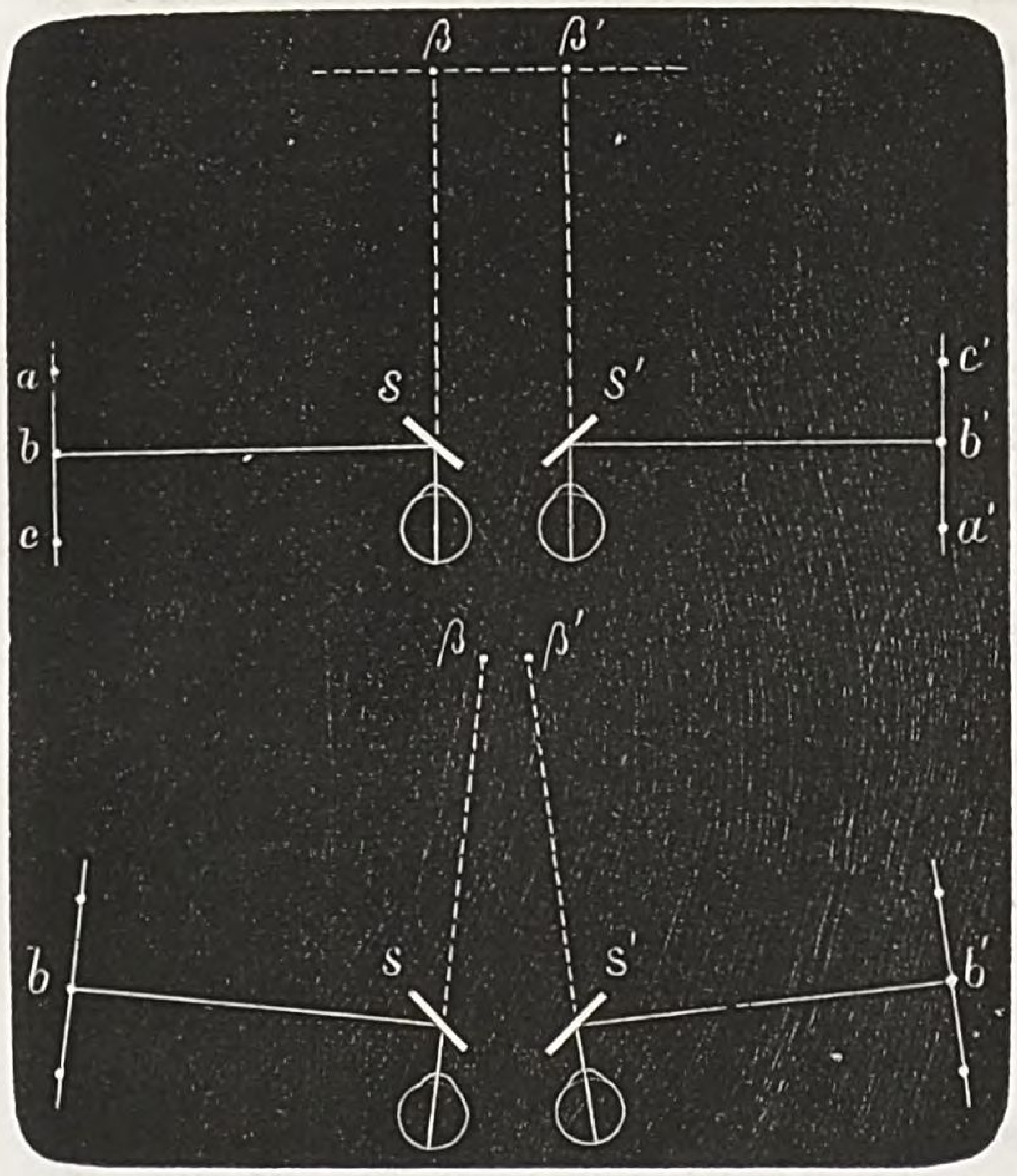


Fig. 21.

Gleichviel ob man die Objecte selbst oder deren Doppelprojectionen zur Untersuchung benutzt, immer muss man solche Objecte wählen, für deren scheinbare Anordnung im Raume keine anderen Umstände, als allein die Stellung des Kopfes und der Augen und die Lage der Bilder auf der Netzhaut bestimmend werden können. Dies ist bei den folgenden Versuchen möglichst angestrebt.

Man hänge eine Anzahl durch kleine Gewichte belasteter, etwa 2 Ctm. von einander abstehender feiner Fäden oder Drähte von verschiedener Stärke vor einem entfernten gleichfarbigen und ebenen Hintergrunde so auf, dass sie sämmtlich in einer verticalen Ebene liegen.[1] Stellt man sich in einem Abstande von etwa 1 Mtr. vor den Fäden auf, so dass alle Fäden von der Frontalebene gleichweit abstehen, hält vor das Gesicht eine kurze Röhre, welche beiden Augen das obere und untere Ende der Fäden verdeckt, und fixirt mit

1 Lässt man die Gewichte in Wasser tauchen, so wird das lästige Pendeln der Fäden bald gedämpft.

horizontaler Blickebene fest den in der Medianebene gelegenen Faden, so erscheinen sämmtliche Fäden in einer Ebene oder in einer Fläche, welche in querer Richtung eine äusserst schwache Krümmung hat, die zunächst vernachlässigt werden kann (s. u.). Die Fäden liegen hierbei ziemlich genau im Horopter der Längsschnitte, wenn man den Kopf so zur Blickebene neigt, dass die Längsschnitte beider Netzhäute senkreckt zur Blickebene stehen.[1] Diesenfalls ist der schematische Längshoropter ein verticaler Kreiscylinder, der durch den Blickpunkt und den mittlen Knotenpunkt beider Augen geht, und diesen Cylinder tangirt die Ebene der Fäden längs des fixirten Fadens. Da der Cylinder etwa einen halben Meter im Durchmesser hat, so ist seine Krümmung schwach, und die dem fixirten Faden näheren Fäden, auf welche es besonders ankommt, liegen nahezu im Cylinder selbst. Lässt man jetzt, während man die Augen schliesst, von einem Gehilfen einen der Fäden aus der Ebene der andern etwas verschieben und blickt wieder auf den Mittelfaden, so erkennt man selbst bei geringfügiger Verschiebung augenblicklich, welcher Faden und in welchem Sinne er verrückt ist. Je näher der bezügliche Faden dem Blickpunkte liegt, eine desto geringere Verschiebung desselben nach vorn oder hinten genügt, um ihn sofort auch näher oder ferner erscheinen zu lassen als seine Nachbarn. Sind die Fäden von vornherein nicht genau in einer Ebene, so sieht man sofort, welche Fäden näher und welche ferner liegen, und stellt man sich die Aufgabe, die Fäden bei fester Fixirung des Mittelfadens wieder in eine Ebene zu bringen, was man mit Hülfe einer passenden Vorrichtung selbst besorgen oder von einen Gehilfen besorgen lassen kann, so bringt man die Fäden wirklich in eine Ebene oder wenigstens in eine Fläche, welche eine ganz schwache regelmässige Krümmung in querer Richtung hat (s. u.).

Fixirt man den Mittelfaden nur mit einem Auge, so ist man über die Anordnung der Fäden sehr unsicher und unterliegt mannichfachen Täuschungen. Versucht man dabei die anfangs nicht in einer Ebene befindlichen Fäden in eine solche zu bringen, so begeht man meist grobe und ganz regellose Fehler: Beweis, dass die Localisirung nur bei binocularem Sehen eine so sichere ist.[2]

1 Wie dies zu controliren ist, wird im Abschnitte über die Augenbewegungen zu besprechen sein.

2 Deshalb eignen sich diese Versuche, wenn man sie z. B. mit steifen Drähten verschiedener Dicke anstellt, welche auf kleinen Stativen befestigt sind und leicht verschoben werden können, zur Entscheidung der Frage, ob jemand binocular sieht oder nicht. Verfällt er dabei in grobe Täuschungen, so sieht er nicht binocular oder ist wenigstens auf einem Auge amblyopisch.

Ist der bei obigem Versuche verschobene Faden nach hinten, d. h. vom Gesichte weggerückt worden, dabei aber vertical geblieben, so befinden sich seine Bilder jetzt nicht mehr auf correspondirenden, sondern auf disparaten Längsschnitten. Das Bild auf der rechten Netzhaut liegt im Vergleiche zum Bilde im linken Auge zu weit nach links, als dass es correspondirend sein könnte, wie Fig. 22

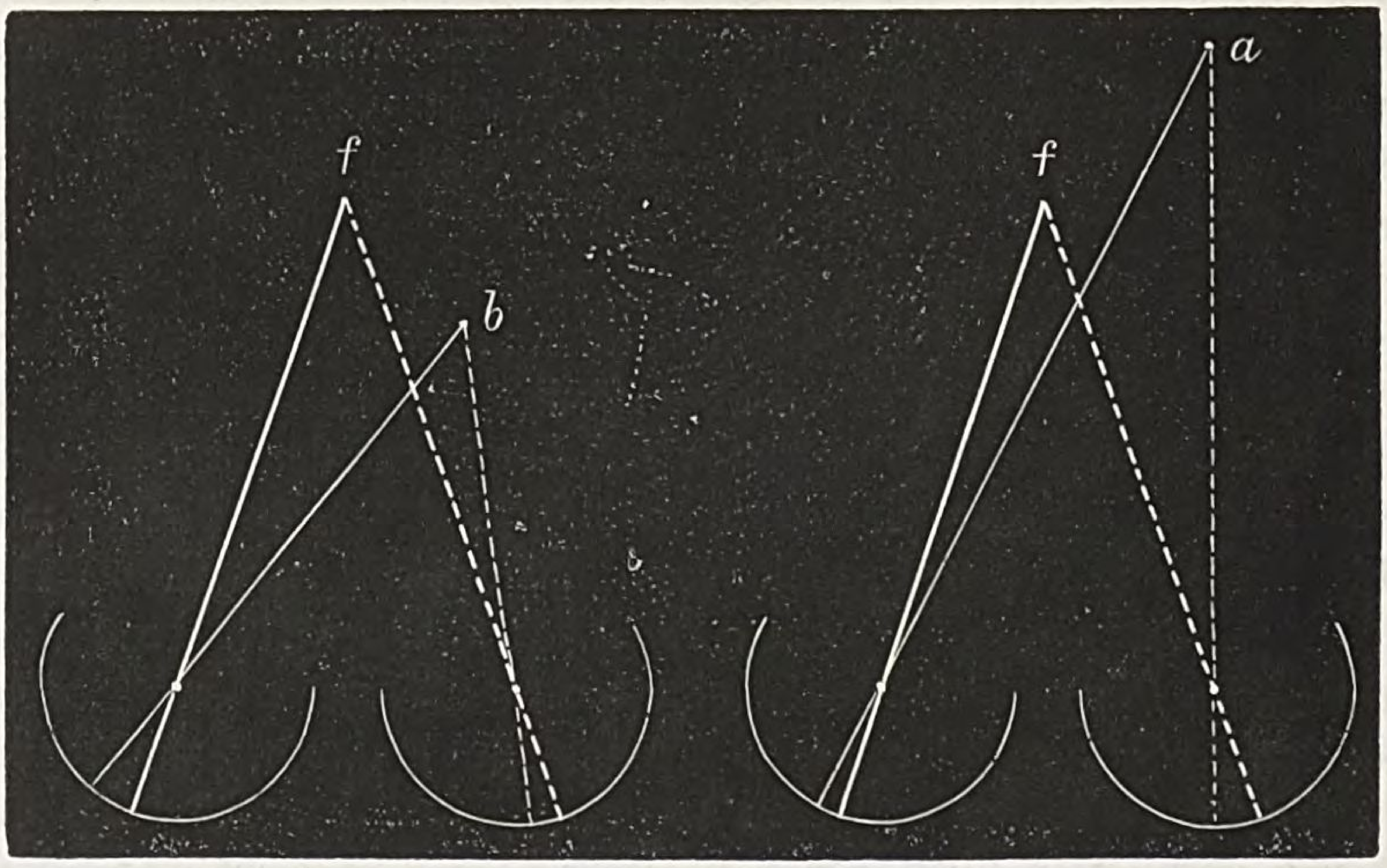


Fig. 22.

zeigt, in welcher *f* den Durchschnitt des fixirten, *a* des verschobenen Fadens bedeutet. Eine solche Art der queren Disparation zweier Netzhäute heisst eine ungekreuzte oder gleichseitige Disparation. Der Grund zu dieser Bezeichnung wird sogleich zu besprechen sein.

Ist der Faden (*b* Fig. 22) aus der Fläche der übrigen und also aus dem Längshoropter nach dem Gesichte hin verschoben worden und dabei vertical geblieben, so liegt jetzt sein Bild auf der rechten Netzhaut im Vergleiche zum linken Netzhautbilde zu weit nach rechts wie es Fig. 22 versinnlicht. Eine solche Art der queren Disparation zweier Netzhautbilder heisst eine gekreuzte oder ungleichseitige Disparation.

Jeder Faden, dessen Netzhautbilder eine ungekreuzte Disparation haben, erscheint also ferner, jeder Faden dessen Bilder gekreuzte Disparation haben, näher als die im Längshoropter selbst gelegenen und deshalb correspondirend abgebildeten Fäden, und zwar wächst, wie man sich leicht bei dem Versuche überzeugen kann, der scheinbare Abstand des Fadens von der scheinbaren Fläche der übrigen

mit der Grösse der queren Disparation ihrer Netzhautbilder und also mit ihrem wirklichen Abstande von der Fläche der übrigen Fäden.

Rückt man den bezüglichen Faden zu weit aus der Ebene der übrigen heraus, so dass die quere Disparation seiner Netzhautbilder ein gewisses Maass überschreitet, so wird er bei fester Fixirung des Mittelfadens, die bei allen diesen Versuchen vorausgesetzt wurde, nicht mehr einfach vor oder hinter der Fläche der übrigen gesehen, sondern doppelt als zwei nebeneinander liegende Fäden: statt eines wirklichen Dinges treten also zwei Sehdinge auf. Ein solches Doppelsehding, dem ein einfaches wirkliches Ding entspricht, heisst ein Doppelbild oder Doppeltrugbild. Jedes der beiden Trugbilder eines Doppelbildes wird auch als Halbbild (Helmholtz) bezeichnet.

Erscheint ein Faden deshalb doppelt, weil er zu weit jenseits der Längshoropterfläche liegt, so verschwindet bei Schluss des rechten Auges das nach rechts liegende Trugbild oder Halbbild, bei Schluss des linken Auges das linke Trugbild, und das Doppelbild heisst deshalb ein gleichseitiges oder ungekreuztes; ist der Faden diesseits der Längshoropterfläche gelegen, so verschwindet bei Schluss des rechten Auges das linke, bei Schluss des linken das rechte Trugbild und das Doppelbild heisst ein ungleichseitiges oder gekreuztes. Deshalb wurde auch oben die entsprechende Art der Disparation der Netzhautbilder analog bezeichnet.

Es hängt von der Uebung im indirecten Sehen und im festen Fixiren ab, ob das Doppelsehen bei einem kleineren oder erst bei einem grösseren Werthe der queren Disparation zweier zusammengehöriger Netzhautbilder beginnt; je grösser diese Uebung ist, bei desto kleinerer Disparation zeigen sich schon die Doppelbilder. Diese Doppelbilder werden noch besonders zu erörtern sein; hier soll es sich nur um den scheinbaren Ort einfach erscheinender Objecte handeln.

Ein dem obigen ganz analoger Versuch lässt sich nach der haploskopischen Methode anstellen. Auf der linken Scheibe des Haploskops befindet sich die linke Hälfte der Fig. 23, auf der rechten die rechte Hälfte. Die Linien f und f' gehen jederseits durch den Fixationspunkt. Die Linienpaare $a\,a'$, $b\,b'$, $c\,c'$ und $d\,d'$ bilden sich dann jedes auf correspondirenden Längsschnitten ab, weil a von f ebensoweit absteht wie a' von f', b von f soweit wie b' von f' u. s. f. Nicht dasselbe gilt von den Linienpaaren $m\,m'$ und $n\,n'$. Das Bild von m liegt auf der linken Netzhaut dem mittlen Längsschnitte näher als das Bild von m' auf der rechten Netzhaut, im Vergleich mit letzterem also zuweit nach rechts und die beiden Bilder haben daher,

insofern man sie als die zusammengehörigen Bilder einer einfachen Aussenlinie betrachten kann, eine gekreuzte Disparation. Die Bilder von *n* und *n'* dagegen haben ungekreuzte Disparation. Die beiden

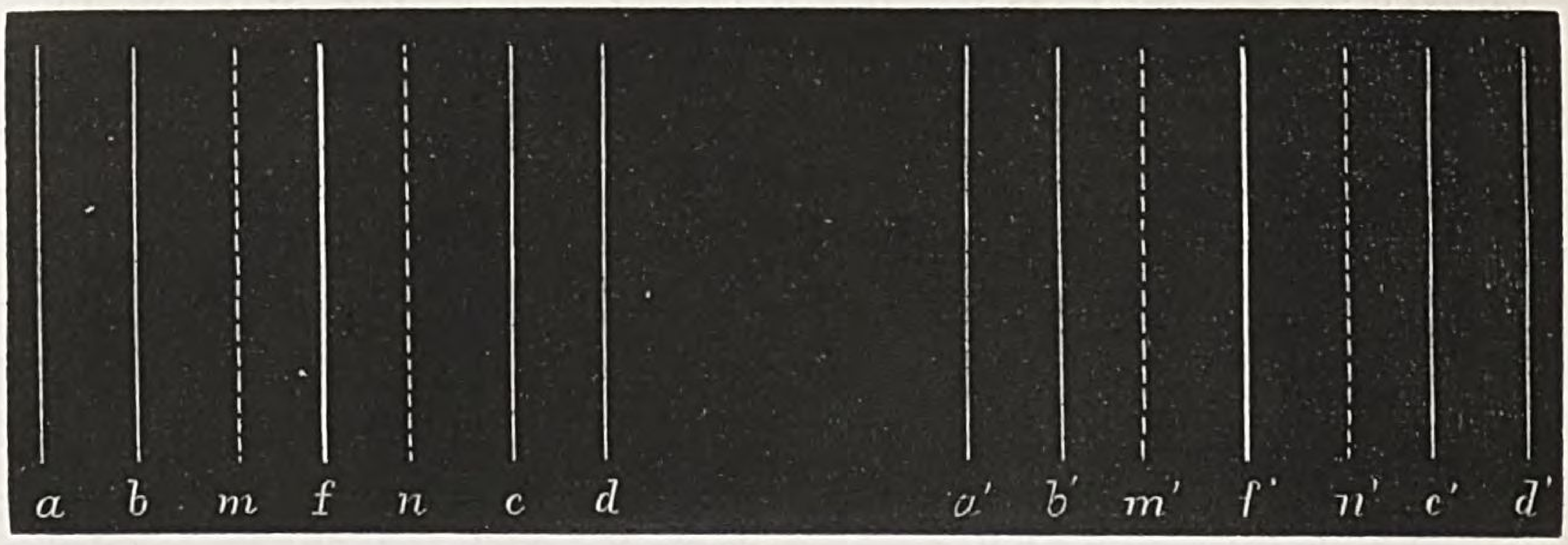


Fig. 23.

Liniensysteme stellen also die Projectionen von sieben verticalen Fäden dar, von welchen fünf, nämlich der mittle und jederseits die beiden äussersten in der Fläche des Längshoropters liegen, der dritte von links dagegen vor, der fünfte hinter dieser Ebene. Dem entsprechend ist nun auch das Anschauungsbild, welches die beiden Systeme bei haploskopischer Vereinigung erzeugen. Man sieht die erstgenannten fünf Fäden[1] in einer Ebene oder wenigstens in einer der Ebene sehr nahe kommenden, sehr schwach gekrümmten, nach dem Gesichte concaven Cylinderfläche (s. u.), den dritten vor, den fünften hinter derselben.

Auf die Anfertigung solcher Doppelzeichnungen wie Fig. 23 muss grosse Sorgfalt verwendet werden. Diejenigen Theile der beiden Zeichnungen, welche sich correspondirend abbilden sollen, müssen sich, wenn man die Linien über einander gelegt denkt, genau decken. Deshalb ist es am besten, diesen Theil der Zeichnungen auf mechanischem Wege zu vervielfältigen und das Uebrige hineinzuzeichnen.

Wenn eine Linie ohne sichtbares Ende sich auf correspondirenden Längsschnitten abbildet, weil sie im Längshoropter liegt, so bildet sich doch nicht auch ein einzelner Punkt der Linie auf Deckstellen ab, vielmehr haben die Netzhautbilder jedes einzelnen Punktes eine sogenannte verticale oder Längsdisparation mit Ausnahme des fixirten und derjenigen Punkte, welche im Punkthoropter liegen. Diese Disparation kommt aber hier nicht in Betracht, weil die Linienbilder im Ganzen auf Deckstellen liegen, obwohl sie sich nicht mit entsprechenden Punkten decken. Je zwei Deckpunktpaare empfangen also gleiche Bilder, und wenn dieselben auch von zwei ver-

1 Falls sie ganz genau gezeichnet sind, was in Fig. 23 nicht der Fall ist.

schiedenen Punkten der Aussenlinie herrühren, so ist doch das Doppelnetzhautbild, auf das es allein ankommt, genau ebenso beschaffen, als wenn die Bilder von einem und demselben Aussenpunkte stammten.

Anders verhält es sich, wenn wir statt des Liniensystems ein isolirtes Punktsystem in den Längshoropter bringen. Hier bildet sich jeder Punkt, der nicht zugleich im Querhoropter und also im Punkthoropter liegt, zwar auf correspondirenden Längsschnitten, nicht aber auf correspondirenden Punkten derselben ab, und seine Bilder haben also eine Längsdisparation.

Um also zugleich diese Längsdisparation zur Geltung kommen zu lassen, kann man kleine Perlen von verschiedener Grösse auf Coconfäden reihen, und sie in unregelmässigen Abständen von etwa $^1/_2$ bis 2 Ctm. mittels einer Gummilösung an den Fäden befestigen. Mit diesen Fäden wiederhole man den eben beschriebenen Versuch und wähle die Beleuchtung und den Hintergrund so, dass man zwar die Perlen deutlich, die feinen Coconfäden aber gar nicht sieht. Wieder wird man die Fäden, wenn sie sich in einer Ebene befinden, auch in einer Ebene oder vielleicht in einer sehr schwach, aber in regelmässiger und symmetrischer Weise gekrümmten Cylinderfläche (s. u.) sehen. Waren die Fäden nicht alle in derselben Ebene, und stellt man sich die Aufgabe, sie in einer solchen anzuordnen, so wird man sie wirklich wieder in eine Ebene oder vielleicht in eine sehr schwach, aber im entgegengesetzten Sinne gekrümmte Cylinderfläche bringen.

Jede der jetzt gleichsam frei in der Luft schwebenden Perlen bildet sich, da die Fäden ziemlich genau im Längshoropter liegen, auf correspondirenden Längsschnitten, nicht aber, mit Ausnahme der fixirten Perle und der sonst noch zufällig im Punkthoropter liegenden, auf correspondirenden Querschnitten ab. Ihre Bilder haben daher zwar Längsdisparation, nicht aber quere Disparation. Doch erscheinen uns alle Perlen, sowohl die im Punkthoropter liegenden und daher auf Deckpunkten abgebildeten, als die übrigen, deren Bilder sich auf disparaten Punkten correspondirender Längsschnitte befinden, in derselben ebenen oder äusserst schwach cylindrisch gekrümmten Fläche. Lassen wir einen Faden verschieben, so sehen wir auch hier sofort alle auf ihm befestigten Perlen aus der Fläche der übrigen im entsprechenden Sinne heraustreten. Auch dieser Versuch lässt sich mittels projectivischer Zeichnungen eines Punktsystems nach der haploskopischen Methode wiederholen.

Man spanne sehr feine Drähte von gleicher Stärke parallel über einen grossen Rahmen so, dass nur drei in einer Ebene, die übrigen

theils vor, theils hinter dieser Ebene liegen; einer der eben genannten drei Drähte gehe durch den Mittelpunkt der Fläche des Rahmens und habe in diesem Mittelpunkt eine Marke. Diesen Rahmen stellt man senkrecht zur Medianlinie so, dass die Fäden horizontal liegen. Lässt man nun Jemanden, der die Anordnung der Drähte nicht kennt, fest die Marke des Mitteldrahtes fixiren aus etwa 1 Mtr. Entfernung durch eine kurze Röhre, welche beiden Augen den Rahmen ganz verdeckt, so ist derselbe nicht im Stande, die Anordnung der Drähte zu erkennen und immer geneigt, sie sämmtlich in einer Ebene zu sehen.

Hierbei bildet sich, falls die mittlen Längsschnitte senkrecht zur Blickebene sind und die Ebene der Drähte parallel der Frontalebene liegt, entweder nur der in der Blickebene liegende, oder wenn die oben beschriebene Incongruenz der Netzhäute vorhanden ist, gar kein Draht auf correspondirenden Netzhautlinien ab. Denken wir uns beide Netzhäute sammt den Bildern der Drähte so ineinander gelegt, dass die mittlen Querschnitte und die Netzhautcentren zusammenfallen, so kreuzen sich je zwei zusammengehörige Drahtbilder unter einem sehr spitzen Winkel, wie es Fig. 24 darstellt, in welcher *q q* die zusammengelegten queren Mittelschnitte, die schrägen unterbrochenen Linien zwei Drahtbilder im linken, die schrägen ausgezogenen Linien zwei Drahtbilder im rechten Auge schematisch darstellen. Diese Drahtbilder haben also keine quere Disparation und erhalten sie auch dann nicht, wenn man nicht fest fixirt, sondern die Convergenz der Gesichtslinien etwas mehrt oder mindert. Dieser Versuch ist seinem wesentlichen Inhalte nach von H. MEYER[1] angegeben worden.

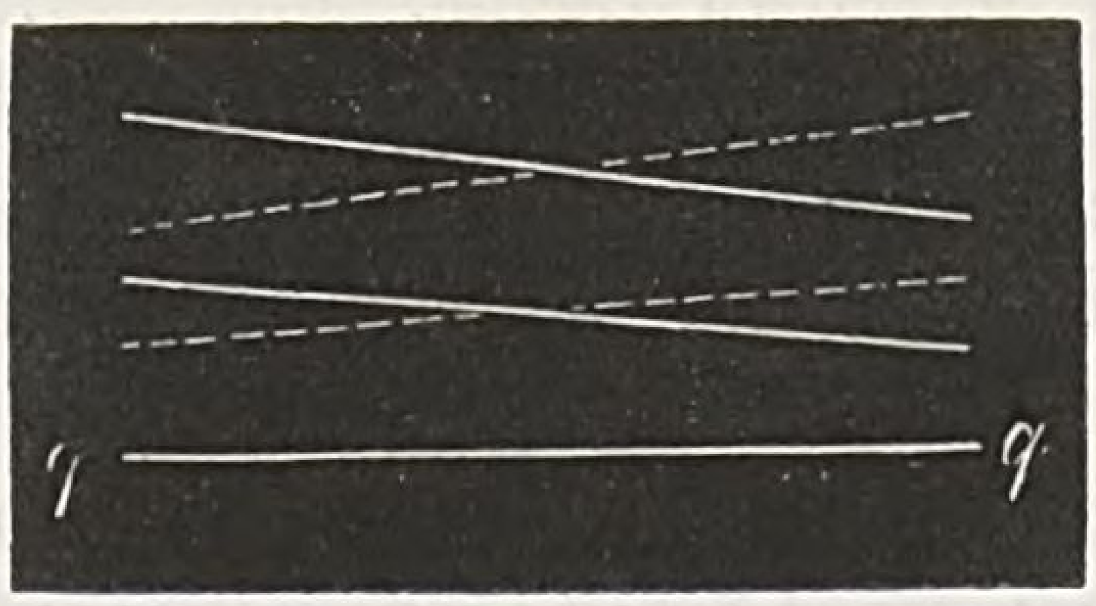


Fig. 24.

Aus allen diesen Versuchen und ihren zahlreichen Modificationen folgt erstens, dass, wenn keine anderweitigen Motive für die Lokalisirung nach der Dimension der Tiefe wirksam sind, bei einer gegebenen Lage des Blickpunktes alle im Längshoropter gelegenen und daher auf correspondirenden Längsschnitten abgebildeten Linien oder Punkte mit grosser Bestimmtheit in einer Fläche erscheinen, welche entweder eine Ebene oder eine sehr schwach gekrümmte Cylinderfläche ist, und dass zweitens alle diesseits der Längshoropterfläche gelegenen Punkte oder Linien, deren Netzhautbilder eine gekreuzte

1 H. MEYER, Arch. f. Ophthalmologie II. 2. Abth. S. 92. 1856.

quere Disparation haben, vor jener Fläche erscheinen, alles jenseits des Längshoropters Gelegene und deshalb mit ungekreuzter Disparation Abgebildete aber hinter jener Fläche erscheint, in der das im Längshoropter selbst Gelegene gesehen wird.

Letztere Fläche nun heisse die **Kernfläche des Sehraums**. In ihr erscheint Alles, was sich correspondirend oder nur mit Längsdisparation abbildet; sie scheidet im Sehraume das mit gekreuzter Disparation Gesehene von dem mit ungekreuzter Disparation Gesehenen. Je grösser die quere Disparation eines Doppelnetzhautbildes, desto weiter erscheint das entsprechende Sehding hinter oder vor dieser Kernfläche. Auch lässt sich durch zweckmässige Modification der obigen Versuche leicht zeigen, dass alle Punkte oder Linien, deren Netzhautbilder eine gleich grosse gekreuzte Disparation haben, gleichweit von der Kernfläche nach vorn abliegend und daher in einer der Kernfläche parallelen Fläche erscheinen, und dass mutatis mutandis dasselbe von allen mit gleich grosser ungekreuzter Disparation abgebildeten Punkten oder Linien gilt.

Nach der Ansicht Hering's [1] ist die Kernfläche immer eine Ebene, sofern nicht anderweite Motive für die Localisirung nach der Dimension der Tiefe ins Spiel kommen. Er betrachtete bei ähnlicher Anordnung, wie die oben geschilderte, ein ebenes System sehr feiner Fäden aus grösserer Nähe und sah bei fester Fixirung des Mittelfadens die Fäden in einer nach dem Gesichte deutlich convexen verticalen Cylinderfläche. Um die Fäden bei Fixirung des Mittelfadens in einer Ebene zu sehen, musste er sie in einer nach dem Gesichte concaven Cylinderfläche anordnen. Die Krümmung jener convexen, wie dieser concaven Cylinderfläche musste um so stärker sein, je näher der Blickpunkt dem Gesichte lag. Verglich er die Krümmung der Cylinderfläche, in welcher die Fäden liegen mussten, um in einer Ebene zu erscheinen, mit der Krümmung des, der gegebenen Convergenzstellung entsprechenden schematischen Längshoropters, so ergab sich, dass die Cylinderfläche des letzteren stärker gekrümmt war, als die Cylinderfläche der Fäden. Er vermuthete daher [2], dass die correspondirenden Längsschnitte nicht genau in der Weise angeordnet sind, wie wir es oben angenommen haben, sondern dass die Breitenwerthe der Längsschnitte auf der äusseren Netzhauthälfte rascher wachsen, als auf der inneren. Es würde dann z. B. die Richtungslinie eines auf der äusseren Hälfte des queren Mittelschnittes der linken Netzhaut gelegenen Punktes mit der Gesichtslinie einen etwas kleineren Winkel einschliessen, als die Richtungslinie des correspondirenden Punktes auf der inneren Hälfte der rechten Netzhaut. An die Stelle des Müller'schen Horopterkreises würde eine andere Curve, für stärkere Convergenzen wahrscheinlich eine Ellipse treten, welche ebenfalls durch den Blickpunkt und die bei-

1 Hering, Beiträge zur Physiologie V. 1864.
2 Die Gesetze der binocularen Tiefenwahrnehmung. Arch. f. Anat. u. Physiol. 1865. S. 82 u. 161.

den mittlen Knotenpunkte ginge, und deren in der Medianebene liegender Durchmesser der kleinere wäre. Durch diese Curve müssten also bei der erwähnten Augenstellung die Fäden senkrecht zur Blickebene hindurchgehen, um in einer Ebene zu erscheinen. Fäden, die in einer wirklichen Ebene liegen, welche die elliptische Cylinderfläche des Längshoropters im fixirten Mittelfaden tangirt, würden mit Ausnahme des letzteren hinter dem Längshoropter liegen und sich auf Längsschnitten von ungekreuzter Disparation abbilden, um so mehr, je weiter sie vom Mittelfaden nach rechts oder links abliegen; daraus würde dann resultiren, dass die Fäden in einer gegen das Gesicht convexen Fläche erscheinen müssten, wie es auch thatsächlich der Fall ist. Es würde sich ferner aus dieser Annahme ergeben, dass in einer gewissen Entfernung vom Auge, bei welcher nach der gewöhnlich angenommenen Anordnung der Deckpunkte der Längshoropter noch eine schwache nach dem Gesichte concave cylindrische Krümmung hat, derselbe bereits eine Ebene und in noch grösserer Entfernung eine nach dem Gesichte schwach convexe Cylinderfläche (zweiten Grades) sein müsste.

Zur Unterstützung dieser Ansicht liesse sich die oben (S. 362) schon erwähnte Beobachtung Kundt's über die Halbirung horizontaler Linien anführen; ferner die Angabe Nagel's[1], dass man bei haploskopischer Vereinigung zweier ganz gleicher ebener Systeme paralleler Verticallinien oder identischer ebener Druckschriften die Linien oder die Zeilen auf einer nach dem Gesichte concaven Fläche zu sehen glaubt.

Wäre diese Hypothese richtig, so böte sich jetzt auch ein einfaches Mittel, den Längshoropter empirisch mit einer viel grösseren Genauigkeit zu bestimmen, als es die weiter unten zu besprechende Methode mit Hülfe der Doppelbilder gestattet.

Aber es steht dieser Hypothese eine andere von Helmholtz aufgestellte entgegen. Dieser meint, dass ein im cylindrischen Längshoropter gelegenes Fadensystem in seiner wirklichen Anordnung, d. h. in einer entsprechenden Cylinderfläche erscheine, wenn nur Vorsorge getroffen sei, dass man das Fadensystem in der richtigen Entfernung localisire. Dies sei aber bei den beschriebenen Versuchen nicht der Fall, vielmehr unterschätze man dabei den Convergenzgrad der Gesichtslinien und sehe daher die Fäden zu fern. Nun kann aber ein entferntes cylindrisches System verticaler Fäden von schwächerer concaver Krümmung genau dieselben Netzhautbilder geben, wie ein näheres und stärker concav gekrümmtes; ein entfernteres convexes System dieselben Bilder, wie ein näheres ebenes; ein näheres concaves System dieselben Bilder, wie ein entfernter liegendes ebenes System. Auf diese Weise würden sich die oben angeführten Täuschungen über die Form des Liniensystems vollständig erklären.

Den Grund dafür, dass wir die Fäden in zu grosse Ferne verlegen[2], sucht Helmholtz in dem Mangel sichtbarer verticaler Distanzen. Er reihte

1 Nagel, Das Sehen mit zwei Augen S. 58.

2 Eine Ausnahme hiervon macht der angeführte Versuch Nagel's, bei welchem das haploskopisch gesehene Liniensystem in der Nähe erscheint, obwohl ein Fadensystem, welches bei parallelen Gesichtslinien dieselben Netzhautbilder giebt, sehr fern liegen müsste. Dies entspricht jedoch ebenfalls der Ansicht von Helmholtz.

deshalb Perlen auf die Fäden. Ein entferntes ebenes System solcher Fäden giebt jetzt nicht mehr dieselben Netzhautbilder, wie ein näheres, concav-cylindrisches, weil zwar die Fäden im Ganzen sich beidenfalls auf denselben Netzhautstellen abbilden und also die horizontalen scheinbaren Distanzen der Fäden in beiden Fällen dieselben sein können, die Perlen eines näheren cylindrischen Systems aber sich mit anderer Längsdisparation abbilden, als die eines ferneren ebenen Systems, und also die verticalen scheinbaren Distanzen für beide Augen nicht in beiden Fällen dieselben sind. Aus diesen Verschiedenheiten der Längsdisparation der beiden Bilder erkennen wir nach Helmholtz, dass das System im einen Falle ein ebenes, im anderen ein cylindrisches ist. Während also Hering annimmt, dass Längsdisparation zweier zusammengehöriger Netzhautbilder ohne allen Einfluss auf die binoculare Tiefenwahrnehmung sei, bietet dieselbe nach Helmholtz eine Mithülfe zur richtigen Localisirung nach der Tiefe.[1] Uebrigens sind die Versuche von Helmholtz mit denen von Hering nicht streng vergleichbar, weil letzterer dieselben bei fester Fixirung angestellt hat, während Helmholtz den Blick von einem Faden zum andern wandern liess.

Gleichviel ob die eine oder die andere Ansicht richtig ist, die oben erörterte Definition und Bedeutung der Kernfläche bleibt dieselbe, nur würde dieselbe bei Ausschluss aller anderweitigen Motive der Localisirung nach Hering stets eine Ebene, nach Helmholtz eine Cylinderfläche sein, deren Krümmungsradius mit der scheinbaren Ferne der Fläche wächst.

Bei symmetrischer Kopfhaltung befinde sich in der Medianebene des Kopfes und in mittler Sehweite ein senkrechter Faden oder Draht, welcher in der Höhe der Augen sich mit einem horizontalen queren Faden oder Draht kreuzt und im Kreuzungspunkt mit letzterem verknüpft ist. Dieser Kreuzungspunkt wird binocular fixirt und dabei Sorge getragen, dass die queren Mittelschnitte der Netzhäute in der horizontalen Blickebene liegen.[2] Der Hintergrund sei ganz gleichfarbig, und eine kurze vor das Gesicht gehaltene Röhre verdecke das obere und untere Fadenende. Lässt man nun den Faden oder auch nur die obere oder untere Fadenhälfte um den fixirten Punkt so drehen, dass sie immer in der Medianebene bleiben, so sieht man den Faden sich in der scheinbaren Medianebene vor- oder zurückneigen bis zu einer gewissen Grenze seiner wirklichen Neigung, über welche hinaus er in Doppelbilder zerfällt. Der Faden tritt hierbei bald vor bald hinter die Längshoropterfläche, und jeder Punkt desselben giebt also ersterenfalls Bilder von gekreuzter letzterenfalls von ungekreuzter querer Disparation. Das Bild eines beliebigen Fadenpunktes steht auf der einen Netzhaut ebensoweit vom mittlen Längsschnitt ab, als sein Bild auf der andern Netzhaut und zwar ist

1 Ueber weitere Versuche, welche Helmholtz zur Stütze seiner Ansicht beibringt, vergl. Physiol. Optik S. 656.
2 Ueber die Controle dieser Netzhautlage vergl. das Capitel über die Augenbewegungen.

die Richtung des Abstandes beiderseits entgegengesetzt. Diese Art der queren Disparation, bei welcher die zusammengehörigen Bilder symmetrisch zu den beiden mittlen Längsschnitten der Netzhäute liegen, heisse eine absolut *symmetrische Querdisparation*.

Der Versuch lehrt also, dass alle Aussenpunkte, welche entweder ein correspondirendes auf den mittlen Längsschnitten liegendes oder ein zu diesen Längsschnitten symmetrisch disparates Doppelnetzhautbild geben, aber gleichwohl nicht als Doppelbilder gesehen werden, in einer Ebene erscheinen, welche unter den besonderen Bedingungen des obigen Versuches mit der scheinbaren Medianebene zusammenfällt. Diese Ebene ist dieselbe, welche wir im vorigen Capitel als die *mittle Längsebene des Sehraums* bezeichneten. Wir sahen, dass dieselbe die Sehrichtungslinien aller auf den mittlen Längsschnitten der Netzhäute liegenden Bilder enthält. Jetzt haben wir erfahren, *dass zugleich auch die Sehrichtungslinien aller mit absolut symmetrischer Querdisparation abgebildeten und einfach gesehenen Aussenpunkte in dieser Ebene liegen*. Dieser Satz lässt sich ebenfalls mittels haploskopischer Versuche erweisen, wenn man entsprechend geneigte gerade Linien durch die beiderseitigen Fixationspunkte legt.

Man fixire wieder unter denselben Bedingungen, wie beim letzten Versuche, einen verticalen Coconfaden, der in der Höhe der Augen eine Perle trägt. Rechts und links sollen sich in nicht ganz gleicher Entfernung vom Gesichte noch einige verticale Coconfäden befinden, an welchen in derselben Höhe je eine Perle befestigt ist, so dass sämmtliche Perlen in der horizontalen Blickebene liegen. Man erkennt hierbei wie schon aus dem oben beschriebenen Versuche mit den Fäden hervorgeht sofort, welche Perlen in einer der Frontalebene parallelen Horizontale liegen, welche näher und welche ferner sind. Alle Perlen werden einfach gesehen, sofern nicht eine oder die andere allzuweit von der Längshoropterfläche abliegt und deshalb ein Doppelbild giebt. Zugleich scheinen alle Perlen, die näheren wie die ferneren in einer Ebene zu liegen, welche unter den gegebenen Bedingungen des Versuchs mit der scheinbaren horizontalen Hauptebene zusammenfällt. Die Perlen geben theils correspondirende, theils gekreuzte oder ungekreuzte Doppelnetzhautbilder. Es folgt also, *dass alle Aussenpunkte, deren Doppelnetzhautbilder, seien sie correspondirende oder disparate, auf den mittlen Querschnitten liegen, in einer Ebene erscheinen, welche wir im vorigen Capitel als quere Mittelebene des Sehraums bezeichneten*.

Eine horizontale Reihe von Perlen sei mittels verticaler Coconfäden so angeordnet, dass sämmtliche Perlen bei Fixirung der mittlen im Horopterkreise liegen, was also wieder voraussetzt, dass die queren Mittelschnitte der Netzhäute in der Blickebene liegen. Die übrigen Versuchsbedingungen seien die gleichen wie beim vorigen Versuche. Jetzt neige man, während die mittle Perle fixirt wird, seinen Kopf nach vorn oder hinten. Dabei nehmen, wie im Capitel über die Augenbewegungen gezeigt werden soll, die Augen eine derartige Stellung an, dass die queren Mittelschnitte der Netzhäute nicht mehr in der Blickebene liegen, sondern einen kleinen Winkel mit der Blickebene einschliessen. Beim Vorneigen des Kopfes convergiren sie etwas nach oben, wie es Fig. 25 schematisch darstellt. Es

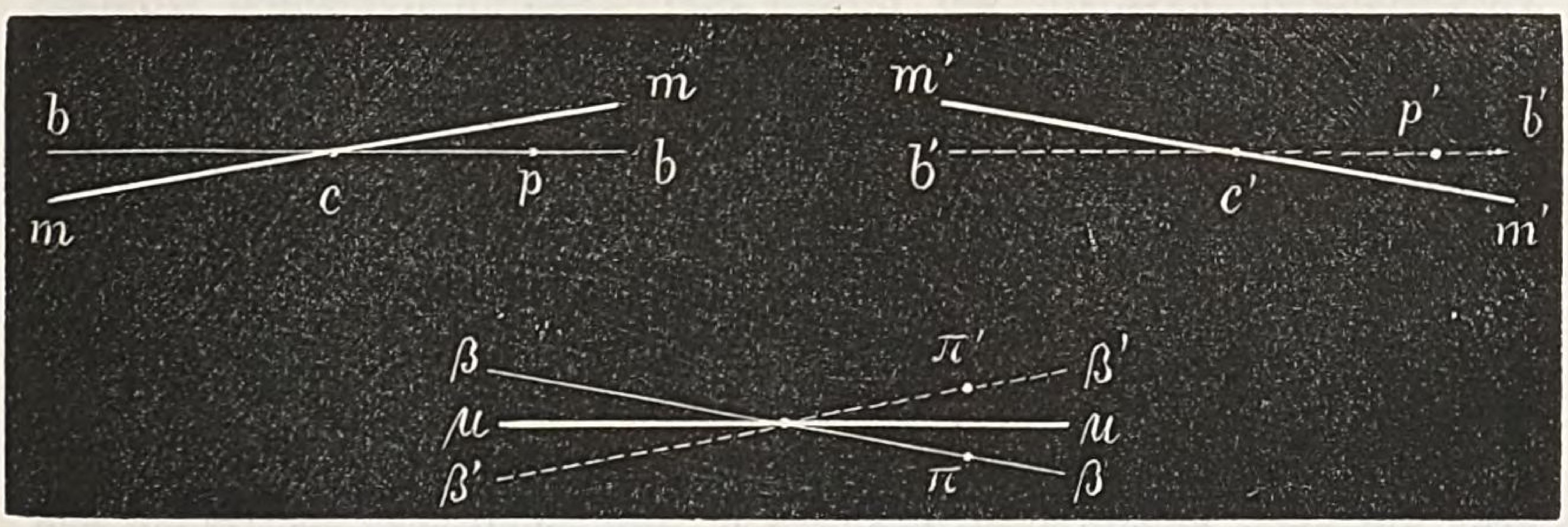


Fig. 25.

ist $b\,b$ und $b'\,b'$ derjenige linke oder rechte Netzhautmeridian, in welchem die Blickebene die Netzhaut schneidet, $m\,m$ und $m'\,m'$ der quere Mittelschnitt jeder Netzhaut. Die Bilder der Perlen befinden sich sämmtlich auf den Meridianen $b\,b$ und $b'\,b'$; die Bilder p, p' einer bestimmten Perle liegen gleichweit von den Netzhautcentren ab, auf correspondirenden Längsschnitten aber auf disparaten Stellen derselben, denn p liegt unterhalb, p' oberhalb des bezüglichen queren Mittelschnittes. Denken wir beide Netzhäute so ineinander gelegt, dass die queren Mittelschnitte zusammenfallen, so stellen $\mu\,\mu$ die so vereinigten Mittelschnitte, π und π' die beiden zusammengehörigen Bilder der Perle dar. Man sieht, dass beide Bilder gleichweit, aber entgegengesetzt von dem queren Mittelschnitte der Doppelnetzhaut abliegen, was man als absolut symmetrische Längsdisparation bezeichnen kann. Trotz dieser Längsdisparation ihrer Bilder erscheint die entsprechende Perle ebenso wie alle übrigen in derselben Ebene wie vorhin, wo sämmtliche Perlenbilder auf den queren Mittelschnitten waren, nämlich in der queren Mittelebene des Sehraums, welche in diesem Falle mit der scheinbaren horizontalen Hauptebene zusammenfällt.

Wir können also die zuletzt ausgesprochene Regel dahin erweitern, dass alle Aussenpunkte, deren Bilder auf correspondirenden oder auf disparaten Stellen der mittlen Querschnitte liegen oder endlich eine absolut symmetrische Längsdisparation haben, in der queren Mittelebene des Sehraums erscheinen.

Im vorigen Capitel wurde gezeigt, dass diese Ebene alle Sehrichtungslinien derjenigen Deckstellenpaare enthält, welche den mittlen Querschnitten der Netzhäute angehören. Die beiden letzten Versuche lehren, dass auch die Sehrichtungslinien disparater Stellenpaare der queren Mittelschnitte, sowie die Sehrichtungslinien absolut symmetrisch längsdisparater Stellenpaare in dieser Ebene liegen, immer vorausgesetzt, dass die auf diesen Stellenpaaren liegenden Doppelnetzhautbilder im Sehraume einfach und nicht als Doppelbilder gesehen werden.

Alles dies lässt sich auch nach der haploskopischen Methode erweisen.

Den auf Seite 403 bewiesenen Satz, dass einfach gesehene Aussenpunkte, deren Bilder symmetrisch zu den mittlen Längsschnitten liegen, in derselben Sehrichtungsebene erscheinen wie die auf den mittlen Längsschnitten selbst disparat oder correspondirend abgebildeten, hat Hering auch auf jedes andere correspondirende Längsschnittpaar übertragen und behauptet, dass jeder Aussenpunkt dessen Netzhautbilder zu einem bestimmten correspondirenden Längsschnittpaare relativ symmetrisch liegen, so dass das eine Bild vom einen Längsschnitt soweit nach rechts (oder links) abliegt, als das andere Bild nach links (oder rechts) vom andern Längsschnitte, in derselben Ebene erscheinen, in welcher auch die auf dem bezüglichen Längsschnittpaare selbst abgebildeten Aussenpunkte gesehen werden. Analog hat er den auf Seite 405 bewiesenen Satz, dass Punkte, deren Netzhautbilder eine zum mittlen Querschnittpaar absolut symmetrische Längsdisparation haben, in derselben Sehrichtungsebene wie die auf den mittlen Querschnitten selbst (disparat oder correspondirend) abgebildeten Punkte erscheinen, auf alle übrigen correspondirenden Querschnittpaare übertragen.

Wenn die Netzhautbilder eines Aussenpunktes keine reine Längsdisparation oder reine Querdisparation haben, sondern schräg disparat sind, so kann man sich die schräge Disparation in eine Längs- und eine quere Disparation zerlegt denken. Ein solcher Punkt erscheint nun nach Hering auf der Sehrichtungsebene desjenigen correspondirenden Längsschnittpaares, zu welchem die quere Componente seiner Disparation symmetrisch ist, und auf der Sehrichtungsebene desjenigen correspondirenden Querschnittpaares, zu welchem die Längscomponente seiner Disparation symmetrisch ist, d. h. also auf der Durchschnittslinie dieser beiden Sehrichtungsebenen.

Diese Sätze wurden theils aus der Beobachtung an wirklichen Objecten, theils aus Versuchen nach der haploskopischen Methode abstrahirt.

Die binoculare Tiefenwahrnehmung auf Grund der Disparation zusammengehöriger Netzhautbilder wurde seit der Erfindung des Stereoskops (vergl. Abschnitt II) vielfach nach der haploskopischen Methode untersucht, am eingehendsten von Panum[1] und Nagel.[2] Die oben angeführten allgemeinen Sätze, welche sich ebenso aus den haploskopischen Versuchen als aus den Versuchen an wirklich einfachen Aussenobjecten abstrahiren lassen, und welche nichts weiter als ein zusammenfassender Ausdruck für die grosse Mannichfaltigkeit der Thatsachen sind, hat zuerst Hering[3] aufgestellt. Ihre Gültigkeit ist ganz unabhängig von der Richtigkeit einer viel bestrittenen Hypothese, welche derselbe zur Erklärung jener Sätze gemacht hat.[4]

Nach der Identitätslehre von Joh. Müller sollte nur das mit Deckstellen Gesehene einfach, alles mit disparaten Stellen Gesehene dagegen doppelt erscheinen. Durch die stereoskopischen Versuche Wheatstone's aber schien bewiesen zu sein, dass auch mit disparaten Stellen einfach gesehen werden könne. Um gleichwohl das Ergebniss dieser Versuche mit der Müller'schen Identitätslehre in Einklang zu bringen, stellte Brücke[5] die Hypothese auf, dass dieses Einfachsehen mit disparaten Stellen nur ein scheinbares sei; dass vielmehr durch Hin- und Herwandern des Blickes unter fortwährender Aenderung der Convergenz die Netzhautbilder der einzelnen Theile des körperlichen Objectes oder seiner beiden Projectionen nacheinander auf Deckstellen gebracht würden, und aus der so entstehenden Reihe successiver correspondirender Eindrücke, welche der jeweiligen Convergenz entsprechend in verschiedener Entfernung localisirt würden, das Anschauungsbild des nach der Dimension der Tiefe ausgedehnten Objectes sich aufbaue. Hiernach würde die zum successiven Einfachsehen der einzelnen Punkte nöthige Aenderung der Convergenz eine Bedingung der binocularen Tiefenwahrnehmung sein.

Inwieweit eine solche Wanderung des Blickpunktes bei der binocularen Tiefenwahrnehmung in Betracht kommt, wird im zweiten Abschnitt zu erörtern sein. Dass aber die letztere auch ohne Blickbewegung möglich ist, wurde auf verschiedene Weise schlagend erwiesen. Dove[6] zeigte, dass die stereoskopische Verschmelzung zweier incongruenter projectivischer Doppelzeichnungen auch bei der Beleuchtung durch den electrischen Funken eintreten kann, dessen Dauer viel zu kurz ist, um die nach Brücke nöthigen Augenbewegungen

1 Panum, Physiol. Untersuchungen über das Sehen mit zwei Augen. Kiel 1858.

2 Nagel, Das Sehen mit zwei Augen. Leipzig u. Heidelberg 1861.

3 Hering, Die Gesetze der binocularen Tiefenwahrnehmung. Arch. f. Anat. u. Physiol. 1865. S. 79 u. 152.

4 Derselbe, Beiträge zur Physiologie V.

5 Brücke, Arch. f. Anat. u. Physiol. 1841. S. 459.

6 Dove, Monatsber. d. Berliner Acad. 1841. S. 252 und Farbenlehre S. 153. 1853.

ausführen zu können. Aubert[1] und nach ihm Helmholtz[2] verbesserten diesen Versuch dadurch, dass sie in den beiden zu verschmelzenden Zeichnungen an entsprechenden Stellen je ein kleines Loch anbrachten, welches von hinten beleuchtet wurde und dem gegenüber liegenden Auge als Fixationspunkt diente, während die Zeichnungen selbst noch verdunkelt waren. Dadurch wurde verhütet, dass nicht die Gesichtslinien im Momente der Beleuchtung eine unpassende Convergenz hatten. Aubert benutzte hierbei auch einen in der Medianebene liegenden Faden, der zur Horizontalebene in einer dem Beobachter unbekannten Weise geneigt war; dabei wurde die Lage des Fadens stets richtig erkannt.

Rogers[3] erzeugte sich erst das Nachbild einer von zwei zusammengehörigen projectivischen Zeichnungen im einen Auge, dann das der andern im andern Auge und sah die beiden Nachbilder stereoskopisch verschmelzen. Hering[4] blickte mit beiden Augen durch eine kurze cylindrische Röhre nach einer ungefähr in mittler Sehweite befindlichen verticalen Nadel, während ein Gehülfe Kugeln von verschiedener Grösse rechts oder links von der Nadel und bald näher bald ferner als dieselbe aus verschiedener Höhe herabfallen liess; er vermochte ebenso wie viele andere Personen stets mit Sicherheit anzugeben, ob die Fallbahn der Kugel näher oder ferner oder gleichfern war wie die Nadel. Er empfahl, diesen einfachen Versuch zu benützen, um festzustellen, ob die Versuchsperson binocular sieht oder nicht. van der Meulen[5] wiederholte diese Versuche und construirte zur bequemeren Vornahme derselben einen Apparat. Donders[6] benützte electrische Funken als Objecte der Tiefenwahrnehmung, nicht blos wie Dove zur Beleuchtung, indem er an bestimmter Stelle des sonst dunklen Raumes fortwährend schwache Inductionsfunken überspringen liess, welche einen scheinbar continuirlich leuchtenden Fixationspunkt bildeten, und ferner oder näher dem Gesichte des Beobachters an verschiedenen Stellen einen anderen einfachen Funken erzeugte. Dabei wusste fast Jeder sofort anzugeben, ob dieser Funken näher oder ferner lag als der Fixationspunkt. Die Meisten wussten auch die Entfernung ziemlich genau zu bestimmen.

Joh. Müller glaubte, dass Deckstellen in Betreff ihrer Raumwerthe identisch seien, wonach es für die räumliche Wahrnehmung ganz gleich-

1 Aubert, Physiologie der Netzhaut S. 315. 1865.
2 Helmholtz, Physiol. Optik S. 740.
3 Rogers, Silliman's Journal 2. XXX. Nov. 1860 (citirt nach Helmholtz).
4 Hering, Arch. f. Anat. u. Physiol. 1865. S. 153.
5 van der Meulen, Arch. f. Ophthalmologie XIX. 1. Abth. S. 113. 1873.
6 Donders, ebenda XIII. 1. Abth. S. 1. 1867.

gültig sein müsste, ob ein Bild auf der rechten Netzhaut oder auf correspondirenden Stellen der linken Netzhaut liegt. Dem widersprechen die in diesem Capitel beschriebenen Thatsachen. Wird z. B. der Punkt *f* Fig. 26 fixirt, so bildet sich *p* mit gleichseitiger Disparation auf den Netz-

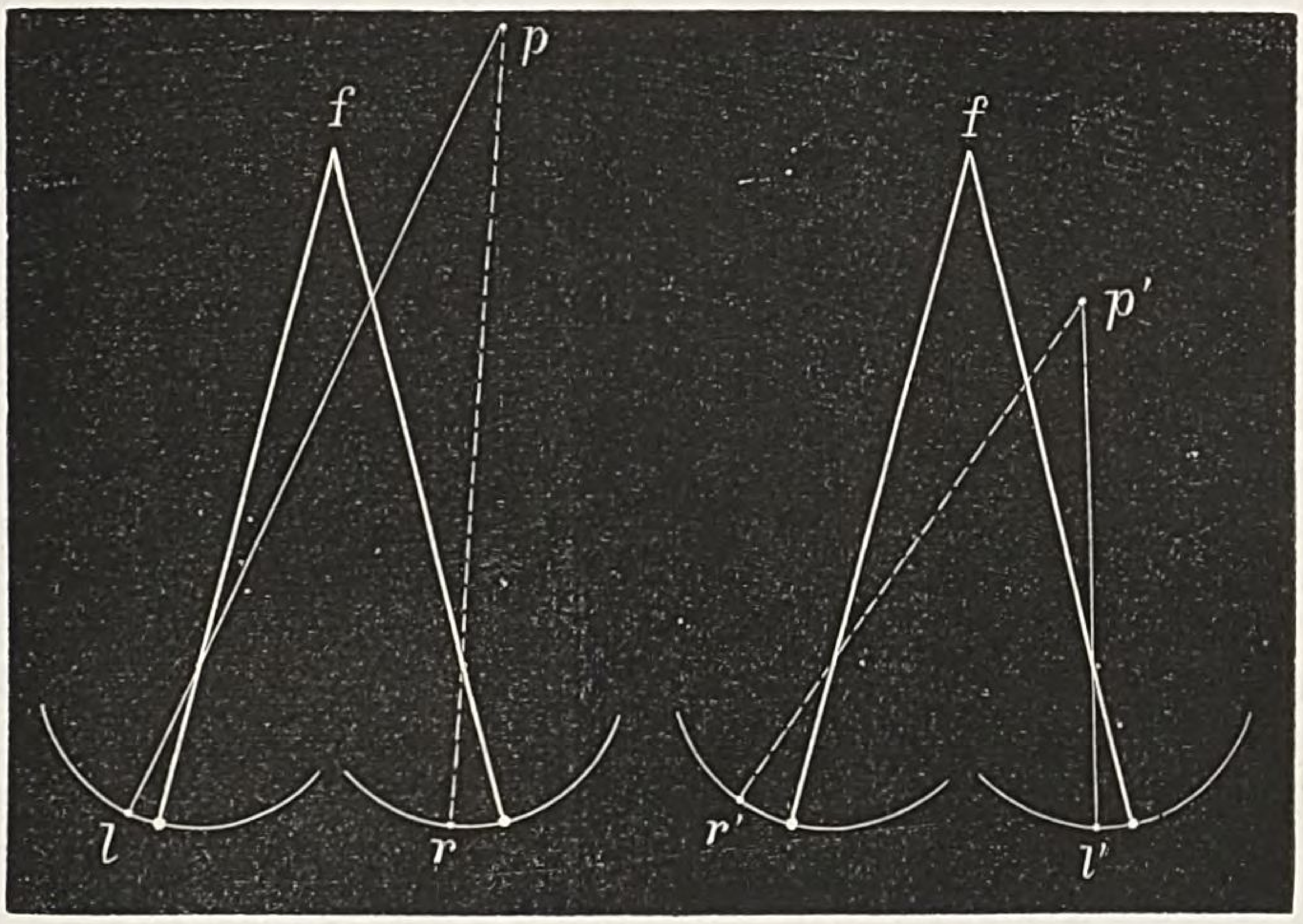


Fig. 26.

hautstellen *r* und *l*, der Punkt *p'* dagegen mit gleich grosser ungleichseitiger Disparation in *r'* und *l'* ab. Nun ist aber *l'* correspondirend mit *l*, *r'* correspondirend mit *r*. Wären also *l* und *l'*, sowie *r* und *r'* für die räumliche Wahrnehmung ganz gleichwerthig, so müsste auch die Localisirung der Punkte *p* und *p'* im Sehraume dieselbe sein, was nicht der Fall ist: *p* wird vielmehr ferner, *p'* näher gesehen als der Blickpunkt *f*. Diesen Widerspruch suchten die Einen dadurch zu beseitigen, dass sie die Correspondenz der Netzhäute überhaupt bestritten und behaupteten, die Netzhautbilder würden in der Richtung ihrer zugehörigen Richtungslinien gesehen, und zwei zusammengehörige Bilder im Durchschnittspunkte ihrer Richtungslinien localisirt, was, wie die bisher angeführten Thatsachen zur Genüge lehren, ganz unzulässig ist; Andere erkannten zwar die Correspondenz an, behaupteten aber gleichwohl, die Netzhautbilder würden auf den Richtungslinien (oder Visirlinien) gesehen, sodass je zweien Deckstellen zwei ganz verschiedene Sehrichtungen zukommen sollten. Man nannte die Richtungslinien deshalb auch Projectionslinien, weil auf ihnen die Netzhautbilder gleichsam in den Aussenraum projicirt werden sollten. „Der scheinbare Ort eines durch zwei zusammengehörige Componenten entstandenen Sammelbildes wird, sagte PANUM [1], durch die Kreuzungspunkte der den Componenten entsprechenden Projectionslinien bestimmt“. Diese Ortbestimmung ist nach seiner Ansicht ein unmittelbarer Empfindungsact, den er als die Empfindung der binocularen Parallaxe bezeichnete.

1 PANUM, Physiol. Untersuchungen über das Sehen mit zwei Augen S. 81. Kiel 1858.

Dem gegenüber bewies Hering[1] ausführlich, dass erstens, wenn man die Correspondenz der Netzhäute anerkennt, man logischer Weise nicht die Richtungslinien als Sehrichtungen ansehen darf; zweitens, dass die Richtungslinien überhaupt nicht die Sehrichtungen sind. Er zeigte, dass je zwei correspondirenden Stellen zwar wirklich ein identischer Höhen- und Breitenwerth zukomme, wie dies Joh. Müller annahm, dass man aber dessen Lehre von der völligen räumlichen Gleichwerthigkeit der Deckstellen aufgeben müsse, weil dieselben betreffs der Tiefenwahrnehmung nicht gleichwerthig sind, was er aus angeborenen Verschiedenheiten der von zwei Deckstellen ausgelösten Empfindungen zu erklären versucht.[2] Auch Helmholtz[3] vertritt die Identität des Breiten- und Höhenwerthes zweier Deckstellen und nimmt ebenfalls an, dass angeborene Verschiedenheiten der Empfindungen zweier Deckstellen die Tiefenwahrnehmung ermöglichen. Aber während Hering diese angeborenen Verschiedenheiten darin sucht, dass die von Deckstellen ausgelösten Empfindungen angeborenermaassen einen verschiedenen räumlichen Charakter (einen verschiedenen „Tiefenwerth") haben, meint Helmholtz, dass die von der rechten Netzhaut ausgelösten Empfindungen sämmtlich durch ein unbekanntes Quale von den Empfindungen der linken Netzhaut verschieden seien, ein Quale, welches ebenso wie die reine Empfindung überhaupt keinen räumlichen Charakter habe, sondern nur mit dazu benutzt werde, aus der Empfindung die entsprechende räumliche Vorstellung oder Wahrnehmung gestalten zu lernen.

Endlich ist noch einer neuen Hypothese von Schön[4] zu gedenken. Derselbe nimmt mit Hering an, dass die Gesichtsempfindungen von vornherein, also angeborenermaassen räumliche sind. Betreffs der Correspondenz der Netzhäute aber geht er wieder auf Joh. Müller zurück und glaubt, dass die von identischen Punkten stammenden Empfindungen räumlich gleichwerthig sind.

Um nun gleichwohl die binoculare Tiefenwahrnehmung erklären zu können, bemüht er sich qualitative Verschiedenheiten der in räumlicher Beziehung als identisch angenommenen Empfindungen zweier Deckstellen aufzufinden, welche Verschiedenheiten als Anhaltpunkt für die richtige räumliche Auslegung dienen sollen. Diese Verschiedenheiten zweier von Deckstellen kommenden Empfindungen beruhen nach seiner Ansicht in der Hauptsache theils darauf, dass die eine Deckstelle erregbarer ist als die andere („Erregbarkeitsmerkmal"), theils darauf, dass beide im Wettstreit der Sehfelder nicht gleichwerthig sind („Wettstreitmerkmal").

Schliesslich möge noch an die bekannte Thatsache erinnert werden, dass bei gewissen Thieren ein angeborenes und bereits weit entwickeltes Vermögen zur Tiefenwahrnehmung vorkommt, wie Jeder weiss, der z. B. frisch ausgeschlüpfte Hühnchen beobachtet hat. Dadurch sind die theoretischen Bedenken, welche die Philosophie gegen die Möglichkeit und Denkbarkeit angeborener Tiefenwahrnehmung vorgebracht hat, thatsächlich be-

1 Hering, Beiträge zur Physiologie II. 1862.
2 Derselbe, ebenda V. 1864 und Arch. f. Anat. u. Physiol. 1865. S. 95.
3 Helmholtz, Physiol. Optik § 31.
4 Schön, Arch. f. Ophthalmologie XXII. 4. Abth. S. 31 und XXIV. 1. Abth. S. 27 und 4. Abth. S. 47.

hoben, und es steht nichts der Annahme entgegen, dass auch die Gesichtsempfindungen des neugeborenen Menschen schon räumliche Eigenschaften haben, welche sich auf alle drei Dimensionen des Raumes erstrecken, wenngleich das Vermögen der klar bewussten Unterscheidung dieser räumlichen Eigenschaften der Empfindungen sich beim Menschen erst nach der Geburt ausbildet, während das gleichsam frühreif geborene Hühnchen sofort ziemlich scharfe räumliche Unterscheidungen nach allen drei Dimensionen des Raumes macht.

SIEBENTES CAPITEL.

Die Richtigkeit der Localisirung im Sehraume.

Wir haben uns im Obigen nur damit beschäftigt zu untersuchen, nach welchen Gesetzen bei unbewegtem Blickpunkt auf Grund des gegebenen Doppelnetzhaubildes der Sehraum sich aufbaut. Wir lernten den Kernpunkt des Sehraumes als den scheinbaren Ort des binocularen fixirten wirklichen Punktes kennen. Wir fanden ferner zwei ausgezeichnete Ebenen des Sehraums, nämlich die mittle Längsebene und die mittle Querebene, welche die scheinbaren Orte aller der Punkte oder Linien enthielten, die sich auf dem mittlen Längsschnittpaar und dem mittlen Querschnittpaar der Doppelnetzhaut oder mit symmetrischer Disparation zu diesen Schnittpaaren abbilden. Jene beiden Ebenen des Sehraums schienen stets einen rechten Winkel einzuschliessen, obwohl der mittle Längsschnitt der Netzhaut in den meisten Augen nicht rechtwinkelig zum mittlen Querschnitte liegt.

Wir lernten ferner ein System von geraden Linien im Sehraume kennen, nämlich das der Sehrichtungslinien und sahen, dass jedem Deckstellenpaare eine dieser Linien zugehört, derart, dass Alles was sich auf diesem Deckstellenpaar (oder auch mit relativ symmetrischer Disparation zu diesem Stellenpaar) abbildet auf jener Linie erscheint. Die Anordnung dieser Sehrichtungslinien im Sehraume fanden wir in gesetzmässiger Weise abhängig von der Anordnung der Deckstellen auf der Doppelnetzhaut.

Endlich fanden wir noch eine dritte durch den Kernpunkt gehende ausgezeichnete Fläche im Sehraume, die Kernfläche, als den gemeinsamen scheinbaren Ort aller Aussenpunkte, welche sich correspondirend oder nur mit Längsdisparation, und aller unbegrenzt gesehenen Linien, die sich auf correspondirenden Netzhautlinien oder we-

nigstens ohne jede quere Disparation abbilden. Diese Fläche erwies sich uns, wenn anderweite aus der Erfahrung entnommene Motive der Localisation fehlten, als eine Fläche von sehr einfacher und ganz gesetzmässiger Form, nämlich als eine symmetrisch zur mittlen Längsebene gelegene Ebene (HERING), beziehentlich Cylinderfläche (HELMHOLTZ).

Es zeigte sich also bei einer gegebenen Lage des Blickpunktes die Anordnung der Sehdinge im Sehraume lediglich abhängig von der Gestalt und Lage der Bilder auf der Doppelnetzhaut. Der Sehraum stellte sich uns dar als ein in sich zusammenhängender Complex räumlich geordneter Gesichtsempfindungen. Der feste räumliche Zusammenhang aller Theile desselben war gegeben einerseits durch das System der Sehrichtungslinien, insofern der Empfindung jedes Deckstellenpaares die gerade Linie vorgeschrieben war, auf der sie im Sehraume erscheinen musste, andererseits durch die Kernfläche, indem durch dieselbe jedem zusammengehörigen Bildpaare sein Ort entweder in dieser Fläche selbst oder, je nach Art und Grösse der queren Disparation, mehr oder weniger vor oder hinter dieser Fläche angewiesen war.

Wir haben uns nun aber zu fragen, inwieweit die so auf Grund der Form und Lage der Netzhautbilder gegebene Anordnung der Sehdinge im Sehraume der wirklichen Lage der Dinge im Aussenraume entspricht, und in wieweit die Localisirung, deren Gesetze wir kennen gelernt haben, auch eine richtige ist; ferner, in wieweit, wenn die Localisirung auf Grund dieser Gesetze unrichtig ist, Abweichungen von denselben vorkommen können, weil anderweite aus der Erfahrung stammende Motive der Localisirung eine Correctur bewirken. Bei alledem wollen wir immer noch eine feste Lage des Blickpunktes und im Allgemeinen auch eine horizontal symmetrische Convergenz der Gesichtslinien annehmen und von den Bewegungen des Blickpunktes ganz absehen.

Zur vollkommen richtigen Localisirung würde gehören, dass sich sämmtliche Sehdinge mit den entsprechenden wirklichen Dingen decken. Dazu ist erstens nöthig, dass der Kernpunkt in Beziehung zum Vorstellungsbilde unseres Körpers, welches wir als richtig und den wirklichen Körper deckend annehmen wollen, dieselbe Lage hat, wie der Blickpunkt zum wirklichen Körper; dass die mittle Längsebene und die mittle Querebene des Sehraumes zusammenfallen mit der Medianebene und der horizontalen Hauptebene des wirklichen Raumes; dass die Kernfläche zusammenfällt mit dem Orte der Aussenpunkte und -linien, welche in ihr erscheinen. Zweitens aber ist

dazu erforderlich, dass jeder Punkt im Sehraume zu den genannten drei Cardinalflächen dieselbe Lage hat, wie der entsprechende wirkliche Punkt zu den entsprechenden Flächen des wirklichen Raumes. Die Sehdinge könnten im Sehraume in Beziehung zu einander ebenso geordnet sein wie die wirklichen Dinge unter sich im wirklichen Raume, aber der Sehraum könnte als Ganzes falsch localisirt werden.

Andererseits könnten bei symmetrischer Convergenz der Gesichtslinie zwar die drei Hauptflächen des Sehraumes mit den entsprechenden Flächen des wirklichen Raumes zusammenfallen, aber das Lageverhältniss der Sehdinge in diesen oder zu diesen drei Hauptflächen des Sehraumes könnte ein anderes sein, als das der Dinge im wirklichen Raume. Wir haben schon Fälle kennen gelernt, in welchen die eine oder die andere der eben genannten Forderungen nicht erfüllt war, und wir wollen jetzt diese Forderungen im Einzelnen erörtern, um zu sehen, in wieweit ihre Erfüllung thatsächlich erreicht wird.

I. Die Localisirung des Kernpunktes.

Wenn im sonst dunklen oder leeren Raume in der Medianebene des Aussenraumes ein einzelner Punkt sichtbar wird, so localisiren wir denselben ziemlich bestimmt und, falls er in der Nähe ist, auch ziemlich richtig, selbst wenn keinerlei Vorwissen uns dabei unterstützt.

Wir haben, wie in der Einleitung auseinander gesetzt wurde, zwischen der Bestimmtheit und der Richtigkeit der Localisirung wohl zu unterscheiden. Wenn in der eben beschriebenen Weise ein einzelner sichtbarer Punkt gegeben ist, und wir machen uns zur Aufgabe, uns demselben so gegenüber zu stellen, dass er in die scheinbare Medianebene zu liegen kommt, so werden wir dabei in den meisten Fällen einen Fehler begehen; der Punkt wird nicht genau in der wirklichen Medianebene liegen, obwohl er uns darin zu liegen scheint. Wiederholen wir den Versuch öfters, so erhalten wir eine ganze Reihe solcher Fehler, welche wir theils als positive theils als negative Fehler bezeichnen, je nachdem sie nach der einen oder anderen Richtung begangen wurden.

Summiren wir alle diese positiven und negativen Fehlerwerthe und dividiren die Gesammtsumme durch die Zahl der Versuche, so erhalten wir entweder Null oder einen positiven oder negativen Werth, den sogenannten constanten Fehler.[1] Dieser ist hier ein Maass für die Richtigkeit der Localisirung. Ist er Null, so ist die Localisirung

1 Vergl. Fechner, Elemente der Psychophysik I. S. 121.

im Allgemeinen richtig. Dass sie nicht auch in jedem Einzelfalle richtig ist, liegt an der nicht zureichenden Bestimmtheit der Localisirung. Ein Maass für den Grad der Bestimmtheit finden wir, wenn wir die Abweichung jedes einzeln gefundenen (rohen) Fehlers vom constanten Fehler suchen, die so erhaltenen Einzelwerthe (reine variable Fehler) ohne Rücksicht auf das Vorzeichen summiren und durch die Zahl der Versuche dividiren. So erhalten wir den mittlen reinen Fehler als Maass der Bestimmtheit der Localisirung.

Weder über die Richtigkeit noch über die Bestimmtheit, mit welcher wir einen in der wirklichen Medianebene liegenden Punkt in dieser Ebene localisiren, liegen messende Untersuchungen vor; doch kann man sich in der eben erwähnten Weise durch einfache Versuche leicht überzeugen, dass beide ziemlich gross sein müssen. In wieweit dabei der Umstand in Betracht kommt, dass bei medianer Lage eines Punktes und ganz gleichem Baue beider Augen auch die grösstmögliche Gleichheit beider Netzhautbilder gegeben ist, wäre ebenfalls zu untersuchen.

Ueber die Richtigkeit und Bestimmtheit, mit welcher ein fixirter, in der horizontalen Hauptebene gelegener Punkt bei Primärstellung des Kopfes und symmetrischer Convergenz in dieser Horizontalebene localisirt wird, fehlen ebenfalls Untersuchungen. Doch kann man auch hier durch einfache Versuche nach Analogie des oben Erwähnten feststellen, dass die dabei begangenen Fehler nicht sehr gross sind.

Dagegen sind mannichfache Versuche angestellt worden in Betreff der scheinbaren Entfernung eines in der Medianebene gelegenen Punktes.

Wundt[1] blickte durch eine Röhre, deren Durchmesser den Abstand beider Augen übertraf, nach einem Faden, dessen Entfernung vom Kopfe variirt werden konnte. Die Enden des Fadens waren ihm unsichtbar, und eine gleichfarbige Wand bildete den Hintergrund. Die scheinbare Entfernung des Fadens suchte er dann auf einem in der Hand gehaltenen Maassstabe abzuschätzen. „Bei diesen Versuchen“, sagte er, „überzeugt man sich alsbald, dass es durchaus unmöglich ist, hierbei ein Urtheil über eine absolute Entfernung zu fällen. Zwingt man sich mit dem Maassstabe in der Hand zu einem Urtheil, so fällt dieses immer zu klein aus, und zwar scheint die wirkliche Entfernung meistens um ein Drittel bis die Hälfte verkürzt,

1 Wundt, Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung. Ztschr. f. rat. Med. III. Reihe. XII. Bd. S. 157. 1861.

ohne dass aber irgend ein constantes Verhältniss zwischen der wirklichen und geschätzten Entfernung stattfindet".

Die grosse Unsicherheit des Ergebnisses dürfte ihren Grund darin haben, dass die scheinbare Entfernung des Fadens mit einer ganz anders gelegenen Raumstrecke aus der Erinnerung verglichen werden musste.

Helmholtz[1] „hielt dicht vor das Gesicht in die Medianebene ein Blatt steifen Papiers und blickte nach einem vertical herabhängenden Faden. Das Papier verdeckte dem rechten Auge alles, was sich links in einigem Abstande neben dem Faden befand, dem linken Auge, was sich rechts neben dem Faden befand. Näherte er nun von der rechten Seite her einen Bleistift dem Faden, so sah er ersteren nur mit dem rechten Auge, nicht mit beiden. Er versuchte dann mit dem Bleistifte den Faden zu treffen, indem er ihn schnell vorschob. Dann ging aber immer der Bleistift hinter dem Faden vorbei. Oeffnete er die vorher geschlossenen Augen, nachdem er seine Stellung geändert hatte, richtete sie auf den Faden und versuchte dann schnell ihn in der angegebenen Weise zu treffen, so war die Entfernung zwischen Bleistift und Faden gering. Wartete er länger, indem er fortdauernd den Faden fixirte, so wurde der Fehler, immer grösser".

Diese Versuche geben keinen unmittelbaren Aufschluss über die Richtigkeit der Localisirung, sondern beleuchten nur den Grad der Harmonie zwischen der optischen Localisirung des fixirten Punktes und der tactischen Localisirung des Fingers.

Nach einem ähnlichen Principe hat später Donders[2] einige messende Versuchsreihen angestellt, jedoch als Object der Localisirung einen leuchtenden Punkt im sonst dunklen Raume benützt. „Der Beobachter befindet sich in einem vollkommen dunklen Kasten, in stehender Haltung, die Stirn unbeweglich gegen zwei Stützpunkte anlehnend, und sieht nach einem in veränderlicher Entfernung hervorgebrachten Blickpunkt, der aus schnell auf einander folgenden, sehr kleinen Inductionsfunken besteht. Nach ein Paar Secunden langer Fixirung hat er mit seinem, mit Kautschuk bekleideten Zeigefinger der rechten Hand den Funken zu treffen. Unmittelbar nach der Bewegung wird das Tageslicht hereingelassen und der Abstand des Lichtpunktes und der Fingerspitze vom Auge in Millimetern abgelesen. Um alle aus der Stärke des Lichtpunktes hervorgehende An-

1 Helmholtz, Physiol. Optik S. 650.
2 Donders, Arch. f. Ophthalmologie XVII. 2. S. 55.

deutung über die Entfernung auszuschliessen, wird die secundäre Rolle ab und zu verschoben. Beständig aber wird der Lichtpunkt so schwach gehalten, dass selbst die Electroden und was sonst noch in dem Kasten zugegen ist, vollkommen unsichtbar bleiben".

Die Entfernungen des Fadens variirten in 50 Versuchen zwischen 60 und 610 mm., 34 mal wurde die Entfernung über-, 12 mal unterschätzt, 4 mal richtig angegeben. Die beiden grössten rohen Fehler betrugen + 35 mm. und — 34 mm. Der constante Fehler betrug nahezu + 7 mm., der mittle reine Fehler 10,6 mm.

Von diesen Versuchen gilt dasselbe wie von denen von HELMHOLTZ; sie geben keinen unmittelbaren Aufschluss über den Grad der Richtigkeit der Localisirung, sondern gestatten vorläufig nur einen ungefähren Schluss auf dieselbe.

In einer anderen Versuchsreihe blieb der Kasten offen, so dass alle Gegenstände erleuchtet waren. Der Untersuchende öffnete die Augen, sah die Electroden, schätzte die Entfernung, schloss die Augen wieder und hatte nun mit dem Finger den Punkt zwischen den Electroden zu treffen. Die Entfernungen variirten in 21 Versuchen zwischen 80 und 630 mm., die grössten rohen Fehler betrugen + 30 und — 12 mm.; 15 mal wurde die Entfernung über-, 5 mal unterschätzt, 1 mal richtig angegeben. Der constante Fehler war 8,5 mm., der grösste variable Fehler 21,5 mm., der mittle variable Fehler 9,8 mm.

Mit wachsender Ferne des Blickpunktes wird die Localisirung des Kernpunktes zunehmend unsicher. Der constante Fehler ist beim Fixiren sehr ferner Objecte immer negativ, die scheinbare Entfernung des fixirten Punktes zu klein, was am auffälligsten bei den Gestirnen, bei nächtlichen Feuerscheinen, entfernten Laternen, Leuchtthürmen u. s. w. hervortritt. Selbst eine richtige Schätzung der Entfernung ändert an dem Zunahsehen ferner Fixationspunkte nichts.

Unter abnormen Bedingungen des Sehens kann der Kernpunkt weit abliegen von dem Orte, der ihm nach der Lage des Blickpunktes zukommen würde. Bei allen oben beschriebenen haploskopischen Versuchen lag der Blickpunkt meist in sehr grosser Ferne, der Kernpunkt des Sehraums aber relativ nahe, etwa in der Entfernung, in welcher sich die beiden Fixationspunkte befanden, oder wenigstens nicht viel weiter. Man kann den beiden Fixationspunkten beim haploskopischen Versuch eine Distanz geben, welche die Augendistanz übertrifft. Dann existirt gar kein Blickpunkt mehr, weil die Gesichtslinien divergiren; einen Kernpunkt des Sehraums aber giebt es nach wie vor.

Es wäre schliesslich zu erörtern, wodurch diese im Allgemeinen ziemlich richtige Localisirung des Kernpunktes möglich wird, wenn uns keinerlei andere, aus der Erfahruug stammende Behelfe über die Lage des Blickpunktes Aufschluss geben. Dies soll im zweiten Abschnitt bei Besprechung der Augenbewegungen untersucht werden.

II. Die Localisirung der mittlen Längs- und Querebene.

Die mittle Längsebene des Sehraums fällt, wie schon wiederholt erwähnt wurde, bei aufrechter Stellung des Körpers und Kopfes und symmetrischer Augenstellung mit der scheinbaren Medianebene zusammen, und ihre Abweichungen von der wirklichen Medianebene sind unter diesen Umständen meist sehr gering.

Man stelle sich aufrecht vor eine horizontale weite Röhre, durch welche hindurch man mit fixirtem Kopfe nach einem feinen Faden oder Draht blickt, der in der Höhe der Augen ein Merkzeichen trägt, das in der wirklichen Medianebene liegt und als Blickpunkt dient. Der Draht oder Faden sei in einer, der Frontalebene parallelen Ebene um das Merkzeichen drehbar, zu welchem Zwecke der Faden über einen grossen Reifen gespannt ist. Den Hintergrund bildet eine gleichfarbige Wand. Lässt man den anfangs zur Medianebene geneigten Faden so lange drehen, bis er in der scheinbaren Medianebene gesehen wird, so weicht seine wirkliche Lage nicht irgend erheblich von der wirklichen Medianebene ab.

Mittels derselben Vorrichtung kann man sich überzeugen, dass bei aufrechter symmetrischer Körper- und Kopfhaltung und horizontaler Blickebene auch die quere Mittelebene des Sehraums sehr angenähert mit der horizontalen Hauptebene des wirklichen Raumes, die hier zugleich Blickebene ist, zusammenfällt. Man lässt zu diesem Zwecke den Faden so lange um das fixirte Merkzeichen drehen, bis er horizontal erscheint[1]; dann ist er auch wirklich angenähert horizontal.

III. Die Localisirung der Kernfläche.

Wenn die mittle Längs- und die mittle Querebene des Sehraums mit der wirklichen Medianebene und der horizontalen Hauptebene des Sehraums zusammenfällt, so ist damit auch schon bestimmt, dass die Kernfläche symmetrisch zur wirklichen Medianebene liegen muss;

1 Wenn der Faden zu nahe ist, kann er doppelt gesehen werden, weil bei horizontal convergirenden Gesichtslinien und Primärstellung des Kopfes die queren Mittelschnitte der Netzhäute nicht genau in der Blickebene liegen.

denn die Längsmittellinie der Kernfläche gehört der mittlen Längsebene des Sehraums an und ebenso ihre quere Mittellinie der mittlen Querebene des Sehraums.

Es fragt sich nun zunächst, ob die Längsmittellinie der Kernfläche so localisirt wird, dass sie mit der entsprechenden Aussenlinie d. i. mit der Geraden des Punkthoropters zusammenfällt; ob also, wenn diese Gerade z. B. vertical liegt, sie auch vertical gesehen wird, oder wenn sie zur horizontalen Hauptebene geneigt ist, auch entsprechend geneigt erscheint.

Nach Hering[1] wird bei primärer Kopfstellung und horizontaler symmetrischer Convergenz eine in der wirklichen Medianebene liegende Gerade bei Ausschluss aller anderweiten Motive der Localisirung nur dann vertical gesehen, wenn sie mit ihrem oberen Ende etwas ferner liegt, als mit dem unteren, und zwar um so mehr, je näher sie überhaupt ist; er erklärt die Täuschung daraus, dass bei ihm mit zunehmender Convergenz die Divergenz der mittlen Längsschnitte nach oben wächst und die Gerade des Punkthoropters sich entsprechend mit dem oberen Ende von der Frontalebene wegneigt.

Nach Helmholtz[2] aber ist unter den genannten Bedingungen nur eine wirklich verticale Gerade auch die scheinbar Verticale in der Medianebene.

Zur Untersuchung benützten die Genannten Fäden, welche innerhalb der Medianebene beliebig zum Horizonte geneigt werden konnten. Der Beobachter blickte durch eine Röhre, welche ihm das obere und untere Fadenende verdeckte und ausser dem Faden nur den gleichfarbigen Hintergrund sichtbar machte. Der Faden muss möglichst fein sein, damit nicht eine etwaige perspectivische Verbreiterung seines näheren Theils im Vergleich zum ferneren seine Lage erkennen lässt.[3]

Wird unter Beibehaltung der horizontal symmetrischen Convergenz der Kopf stark zurückgeneigt, was beim gewöhnlichen Sehen nie geschieht und also hier künstlich erzwungen ist, so drehen sich dabei die mittlen Querschnitte erheblich aus der horizontalen Blickebene heraus und convergiren nach unten; entsprechend ändern auch die mittlen Längsschnitte der Netzhäute ihre Lage und werden convergent nach oben. Eine in der Medianebene befindliche nahe Ge-

1 Hering, Beiträge zur Physiologie V. S. 297. 1864 und Arch. f. Anat. u. Physiol. 1865. S. 83.

2 Helmholtz, Physiol. Optik 1868. S. 661.

3 Besser wäre es, eine grosse ebene Glastafel zur einen Hälfte mit schwarzem, zur anderen mit weissem Papiere zu überziehen und die Grenzlinie beider statt des Fadens zu benutzen.

rade, welche jetzt vertical erscheinen soll, muss nach HERING mit dem oberen Ende soweit stirnwärts geneigt werden, dass sie annähernd in den Punkthoropter zu liegen kommt und sich auf den mittlen Längsschnitten abbildet. Nach HELMHOLTZ, welcher diese Versuche wiederholte, muss die Gerade zwar auch in der erwähnten Weise geneigt werden, aber soweit, dass sie sich auf denjenigen Netzhautmeridianen abbildet, welche bei parallel und horizontal geradeaus gestellten Gesichtslinien und gleicher Kopfhaltung wirklich vertical sein würden. Dies sind aber für Augen mit Netzhautincongruenz nicht genau die mittlen Längsschnitte. Die Differenz der beiderseitigen Angaben ist also nicht wesentlich. Ganz analoge Ergebnisse erhielten beide Beobachter unter sonst denselben Bedingungen bei Vorwärtsneigung des Kopfes. Die in der Medianebene gelegene Gerade musste mit dem oberen Ende vom Gesicht weg geneigt werden, um vertical zu erscheinen.

HELMHOLTZ[1] hat auch für unsymmetrische horizontale Parallel- und Convergenzstellungen der Gesichtslinien bei vorwärts und rückwärts geneigtem Kopfe die wirkliche Lage derjenigen binocular fixirten Linien zu bestimmen versucht, welche ihm vertical erschienen. Er kam zu dem Ergebniss, dass unter diesen Umständen diejenigen Linien vertical erschienen, welche sich abbildeten auf solchen Meridianen der Netzhäute, welche bei derselben Kopfhaltung wirklich vertical sein würden, wenn die Gesichtslinien nicht convergent sondern zur Halbirungslinie des wirklichen Convergenzwinkels parallel ständen. Dies würden im Allgemeinen andere Meridiane sein als die mittlen Längsschnitte. Uebrigens ist es schwer und sehr anstrengend bei vorwärts oder rückwärts geneigtem Kopf und unsymmetrischer Convergenz der Gesichtslinien die Blickebene horizontal zu halten; man giebt derselben dabei unwillkürlich durch Drehen des Kopfes eine Neigung zum Horizonte.

IV. Die Localisirung in die Kernfläche.

Durch die Lage der Längsmittellinie der Kernfläche ist nun die relative Lage dieser Fläche zur wirklichen Medianebene und horizontalen Hauptebene vollends bestimmt. Wir sahen, dass jene Mittellinie ziemlich genau in die wirkliche Medianebene verlegt wird; betreffs ihrer Neigung zum Horizonte fanden wir eine Differenz in den Angaben der Beobachter, die aber praktisch genommen nicht ins Gewicht fällt. Jetzt fragt sich nur noch, in wieweit die Form der Kernfläche der Anordnung derjenigen wirklichen Aussendinge entspricht, welche in ihr erscheinen. Von den vielen möglichen Fällen,

1 HELMHOLTZ, Physiol. Optik S. 662.

welche hier in Betracht kommen, sind besonders zwei bisher genauer untersucht worden. Erstens der Fall, wo die in der Kernfläche erscheinenden Aussenpunkte oder Linien im Längshoropter liegen. Dieser Fall ist oben erörtert worden, und wir haben gesehen in wieweit die Form der Kernfläche von der Form der Längshoropterfläche abweichen und damit eine Differenz zwischen wirklicher und scheinbarer Lage des in der Längshoropterfläche Enthaltenen eintreten kann.

Der zweite Fall ist der, wo unbegrenzt gesehene gerade Linien im Meridianhoropter liegen und sich also auf correspondirenden Meridianen abbilden. v. Recklinghausen[1] fand, dass bei symmetrischer Convergenz der Gesichtslinien gerade Linien, welche in einer senkrecht zur Medianlinie (Halbirungslinie des Convergenzwinkels) stehenden Ebene gelegen sind und durch den Blickpunkt gehen, nur dann auch in einer Ebene erscheinen, wenn die queren Mittelschnitte der Netzhäute in der Blickebene liegen. Diesen Falls nämlich liegt der von den Linien gebildete ebene Stern im Meridianhoropter und bildet sich jede Gerade des Sternes auf correspondirenden Meridianen ab. Sind aber die queren Mittelschnitte zur Blickebene geneigt, was bei horizontaler Blickebene durch starkes Vor- oder Rückwärtsneigen des Kopfes herbeigeführt wird, so ist der Meridianhoropter nicht mehr die zur Medianlinie senkrecht stehende Ebene, sondern eine Kegelfläche (Doppelkegelmantel), deren Mittelpunkt (Spitze) im Blickpunkt liegt[2]; deshalb muss man jetzt die einzelnen Strahlen so weit aus der genannten Ebene herausdrehen, bis sie in diese Kegelfläche zu liegen kommen und sich wieder correspondirend abbilden, wenn anders sie als ein ebener Stern erscheinen sollen. Dies ist also eine weitere Bestätigung des oben aufgestellten Satzes, dass alle unbegrenzt gesehenen Geraden, welche sich correspondirend abbilden, in der Ebene der Kernfläche erscheinen. Ordnet man bei den letzterwähnten Augenstellungen die Geraden nicht in der Kegelfläche des Meridianhoropters an, sondern lässt sie in der zur Medianlinie senkrechten Ebene, so liegen sie zur einen Hälfte jenseits zur andern diesseits des Meridianhoropters, bilden sich daher disparat ab und scheinen entsprechend mit der einen Hälfte jenseits, mit der andern diesseits der Kernfläche zu liegen, als ob sie einer krummen aber geradlinigen Fläche angehörten.

Der hier erörterte Fall von Täuschung über die Lage unbegrenzt gesehener Geraden ist übrigens nach Hering[3] nur einer von unzähligen

1 v. Recklinghausen, Arch. f. Ophthalmologie V. 1. Abth. S. 155. 1859.
2 Siehe oben Capitel III.
3 Hering, Beiträge zur Physiologie IV. S. 236.

möglichen. Insbesondere ist jeder Punkt des Punkthoropters im Allgemeinen der Mittelpunkt einer Kegelfläche zweiten Grades, welche dadurch ausgezeichnet ist, dass jede in ihr gelegene Gerade sich auf correspondirenden Netzhautlinien abbildet und daher, wo sonstige Motive für die Localisirung fehlen, in der ebenen Kernfläche erscheint.

Durch jeden bei gegebener Lage des Blickpunktes beiden Augen sichtbaren Aussenpunkt lässt sich eine bestimmte Gerade legen, welche sich in beiden Augen auf correspondirenden Netzhautlinien abbildet [1] und also ebenfalls in der Kernfläche erscheint.

Jede in der Blickebene liegende Gerade bildet sich, wenn die queren Mittelschnitte der Netzhäute in der Blickebene liegen, auf diesen und also correspondirend ab, und wird daher in der queren Mittellinie der Kernfläche gesehen, wenn alle andern Behelfe zur Lokalisirung fehlen. Ein feiner horizontaler Coconfaden z. B., der genau in der Medianebene verläuft, scheint unter diesen Umständen parallel zur Frontalebene durch den Blickpunkt zu gehen, so dass seine scheinbare Lage mit der wirklichen einen rechten Winkel einschliesst.

Gerade, unbegrenzt gesehene Linien, welche bei der angegebenen Augenstellung horizontal und senkrecht zur Medianebene über oder unter der horizontalen Hauptebene, näher oder ferner als der Blickpunkt liegen, geben zwar disparate Netzhautbilder wie sie in Fig. 24 S. 400 dargestellt wurden, erscheinen aber gleichwohl in der ebenen Kernfläche, weil ihre Bilder keine quere Disparation haben. Betreffs der horizontalen Linien kommen also die gröbsten Unrichtigkeiten der Localisirung vor, wenn anderweite Hülfsmittel für letztere fehlen. Man braucht aber nur, wie Meyer (l. c.) und v. Recklinghausen (l. c.) zeigten, einen oder einige Merkpunkte auf den Linien anzubringen, um sie sofort annähernd richtig localisiren zu können.

Wir haben gesehen, was Alles bei Ausschluss anderweiter Motive der Localisirung in der Kernfläche erscheinen kann; theils Objecte, welche in derjenigen Fläche des wirklichen Raumes liegen, mit welcher die Kernfläche des Sehraums zusammenfällt, theils auch ausserhalb dieser Fläche Gelegenes. Meistens aber, und insbesondere wenn die erörterten Fälle von correspondirend abgebildeten unbegrenzten Linien nicht gegeben sind, erscheinen in der Kernfläche nur solche Objecte, welche wirklich ziemlich genau in der entsprechenden Fläche des Aussenraums liegen. Dies ist z. B. der Fall, wenn wir bei horizontal symmetrischer Convergenz der Gesichtslinien eine mässig entfernte verticale Ebene fixiren, auf welcher verschiedene ebene Figuren sichtbar sind. Wir können dabei unsern Kopf

1 Helmholtz, Physiol. Optik S. 716.

so stellen, dass die mittlen Längsschnitte der Netzhäute vertical liegen und der Längshoropter eine verticale Cylinderfläche ist, welche die Wand in ihrer Längsmittellinie tangirt. Liegt der Blickpunkt nicht zu nahe, so ist die Abweichung der Wandebene von der Längshoropterfläche unbedeutend. Localisiren wir nun den Blickpunkt in die richtige Entfernung, so fällt auch die Kernfläche, wie aus der Erörterung im vorigen Capitel hervorgeht, ebenfalls nahezu mit der Wand zusammen. Für solche einfachste Fälle fragt sich nun, in wieweit die scheinbare Form und Anordnung der Figuren in der Kernfläche der Wirklichkeit entspricht. Wir setzen dabei immer voraus, dass es sich um einfachste Figuren handelt, um gerade Linien oder auf der Wand vertheilte Punkte, von deren wirklicher Lage wir nichts vorwissen. Ferner setzen wir voraus, dass die Grenzlinien der Wand unsichtbar sind, was durch eine vor die Augen gehaltene weite Röhre zu erreichen ist. Diesenfalls gilt nun wieder das, was wir im Capitel II von der Anordnung der Sehdinge im ebenen Sehfelde im Vergleich zur Anordnung der Figuren im ebenen Objectfelde erörtert haben. Die Kernfläche ist jetzt das ebene Sehfeld, dessen Inhalt jedoch hier den Netzhautbildern beider Augen entspricht, während dort nur die Bilder einer Netzhaut in Betracht kamen. Die dort erwähnten Abweichungen der scheinbaren Form und Grösse von der wirklichen kehren hier wieder. Nur die Täuschung in Betreff der horizontalen und verticalen Linien fällt in der Kernfläche weg. Denn wenn auch die wirklich Verticalen oder Horizontalen der Wand sich nicht genau auf den Längs- oder Querschnitten abbilden, so ist doch die Disparation ihrer Bilder zu diesen Netzhautschnitten eine symmetrische und jene Linien erscheinen demnach vertical und horizontal wie sie sind.

Ueber die Richtigkeit der Lokalisirung des ausserhalb der Kernfläche Gelegenen (und einfach Erscheinenden) liegt eine kleine Versuchsreihe von Donders[1] vor, welche nach derselben Methode angestellt wurde, wie die Versuche über die Localisirung des Blickpunktes (s. o. S. 415).

„Während der Lichtpunkt im Kasten in einer festen Entfernung von 300 mm. fixirt wurde, liess man einen einzelnen stärkeren Inductionsfunken überspringen, bald in grösserer, bald in geringerer Entfernung vom Fixirpunkt und mehr oder weniger nach rechts oder links, immer im Bereich der Hände. Der Ort, wo der Funken übersprang, musste nun wieder mit dem Finger angewiesen werden.“

1 Donders, Arch. f. Ophthalmologie XVII. 2. S. 59. 1871.

In der von Donders mitgetheilten Versuchstabelle ist nur der Tiefenabstand des seitlichen Funkenortes und des an seinen scheinbaren Ort gebrachten Fingers vom Gesichte angegeben; der Abstand von der Medianebene fehlt. Es wurden 29 Versuche gemacht; der grösste Tiefenabstand des seitlichen Funkens vom Gesichte betrug 600 mm., der kleinste 210 mm., der mittle 379,7 mm. Die grössten rohen Fehler waren + 120 und — 68, der constante Fehler betrug + 8,7 mm., der mittle reine Fehler beiläufig 34 mm.

Donders bemerkte noch, dass, wenn der Funke stark seitlich übersprang und zwar ungefähr in gleicher Entfernung mit dem Blickpunkte, die Entfernung regelmässig zu gross geschätzt wurde, und führt dies als Bestätigung des oben dargelegten Satzes an, nach welchem ein seitlich in gleicher Entfernung mit dem Blickpunkte gelegener Punkt ferner als der letztere erscheint, weil er jenseits des Längshoropters liegt.

Einen directen Aufschluss über die Richtigkeit der Localisirung geben auch diese Versuche nicht.

Ueberblicken wir das Ergebniss unserer Untersuchung über die Richtigkeit der Localisirung des mit unbewegtem Blicke binocular und einfach Gesehenen, so ergiebt sich, dass bei primärer Kopfstellung und symmetrisch horizontaler Convergenz der Gesichtslinien gröbere Fehler nur in Betreff derjenigen Linien vorkommen, welche in ihrem Verlauf keine Merkpunkte haben und sich entweder auf correspondirenden Netzhautlinien oder wenigstens ohne quere Disparation abbilden. Einzelne Punkte dagegen oder Linien mit Merkpunkten werden, wie wir fanden, ziemlich richtig localisirt, und zwar um so richtiger, je näher sie dem Blickpunkte beziehungsweise der Fläche des Längshoropters liegen.

Wir fanden, dass der Kernpunkt mit dem Blickpunkte, die mittle Längsebene des Sehraums mit der wirklichen Medianebene, die mittle Querebene mit der wirklichen horizontalen Hauptebene ziemlich genau zusammenfällt. Betreffs der Kernfläche sahen wir, dass, wenn correspondirend abgebildete Linien ohne Merkpunkte ausgeschlossen sind, nur das in ihr erscheint, was in der Fläche des Längshoropters liegt, und dass diese wenigstens beim Nahesehen nahezu da liegt, wo sie als Kernfläche erscheint. Trotz der vielen Täuschungen also, welche, wie wir sahen, möglich sind, entspricht doch beim Nahesehen der scheinbare Ort der Dinge im Allgemeinen wenigstens annähernd ihrem wirklichen, selbst wenn jedes anderweite Hülfsmittel für die Localisirung und insbesondere die Mithülfe der Augenbewegungen ausgeschlossen ist.

Wir hätten schliesslich noch die Aufgabe, die Richtigkeit der Localisirung bei andern Stellungen des Auges und des Kopfes zu erörtern. Dieselbe ist jedoch bisher nicht systematisch untersucht worden. Einzelnes ist darüber oben beiläufig bemerkt worden, Anderes wird noch im zweiten Abschnitte zu erwähnen sein.

ACHTES CAPITEL.

Das Doppelsehen des Einfachen und das Einfachsehen des Doppelten.

Wenn die Disparation der beiden von einem Punkte oder einer Linie oder sonst welchem kleinen Objecte entworfenen Netzhautbilder eine gewisse Grösse überschreitet, so sehen wir, wie schon S. 397 erwähnt wurde, das einfache Aussenobject doppelt. Das diesseits der Fläche des Längshoropters Gelegene gibt ungleichseitige oder gekreuzte, das jenseits Gelegene gleichseitige oder ungekreuzte Doppelbilder. Der Längshoropterfläche angehörende Punkte geben Doppelbilder von reiner Längsdisparation, welche bei aufrechter Kopfhaltung und symmetrischer Augenstellung übereinander erscheinen; dem Querhoropter angehörende Punkte geben Doppelbilder von reiner Querdisparation, welche unter den erwähnten Umständen nebeneinander erscheinen. Ausserhalb der genannten beiden Horopterflächen liegende Punkte geben Doppelbilder, die schräg gegen einander verschoben sind. Gehören die Bilder eines Doppelbildes beide den linken oder beide den rechten Netzhauthälften an, so erscheinen beide Trugbilder auf derselben Seite des Sehraumes oder des Sehfeldes, also beide nach rechts oder nach links von der mittlen Längsebene des Sehraumes oder der mittlen Längslinie des Sehfeldes; sie heissen dann einseitige, andernfalls aber doppelseitige Doppelbilder.

Fig. 27 stelle die Blickebene dar, während die queren Mittelschnitte der Netzhaut in derselben liegen, f sei der Blickpunkt, $k' f k''$ der MÜLLER'sche Horopterkreis. Die von ihm eingeschlossene Fläche enthält Punkte der Blickebene, welche ungleichseitige oder gekreuzte Doppelbilder ($|rl$, $r|l$ und $rl|$) geben; ausserhalb des Kreises gelegene Punkte geben gleichseitige oder ungekreuzte ($|lr$,

l | *r* und *lr* |). Die zwischen den beiden Gesichtslinien (*k' g* und *k'' g'*) gelegenen Abschnitte der Blickebene *k' f k''* und *g' f g* enthalten Punkte, welche doppelseitige Doppelbilder erzeugen (*r* | *l* und *l* | *r*). Ausserhalb dieser Abschnitte gelegene Punkte geben einseitige Doppelbilder.

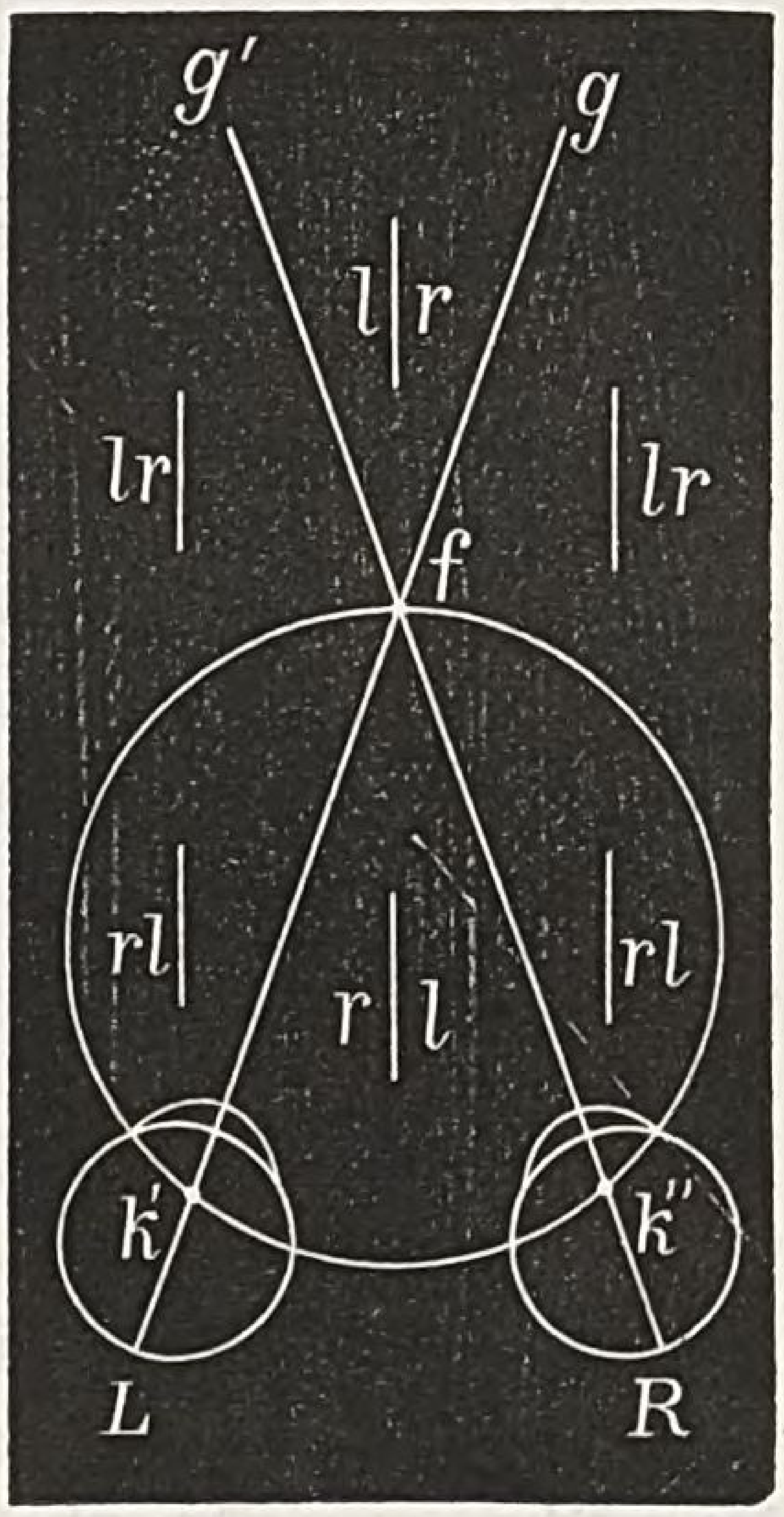


Fig. 27.

Für gewöhnlich sieht man keine Doppelbilder und vielen Laien sind dieselben unbekannt, obwohl fast immer Objecte da sind, welche sich auf sehr disparaten Stellen abbilden. Man fasst beim gewöhnlichen Sehen mit wanderndem Blicke nur das genauer auf, was in der Gegend des Blickpunktes liegt und daher nur Bilder von kleiner Disparation geben kann. Sobald etwas excentrisch im Sehraume Erscheinendes unsere Aufmerksamkeit erweckt, richten wir auch sogleich die Gesichtslinien auf das entsprechende Aussenobject, sodass der Blickpunkt auf dasselbe zu liegen kommt. Will man Doppelbilder sehen lernen, so muss man einen Punkt fest fixiren, und dann kleine vom Hintergrunde gut abstechende Gegenstände nahe der Medianebene jenseits oder diesseits des Blickpunktes anbringen. Fixirt man z. B. einen nahe vor's Gesicht gehaltenen Finger und hält 1—2 dm. dahinter einen Bleistift, so sieht man denselben in gleichseitigen Doppelbildern. Bringt man aber an die Stelle des Bleistiftes ein grösseres Blatt Papier, so sieht man dasselbe einfach, weil seine beiden Bilder sich theilweise decken, und nur bei genauerer Beobachtung bemerkt man, dass seine Ränder doppelt erscheinen.

Correspondirend mit der Netzhautstelle, welche das dem einen Trugbilde eines Doppelbildes entsprechende Netzhautbild trägt, liegt auf der andern Netzhaut das Bild irgend eines andern Objectes. Ist letzteres eine gleichfarbige Fläche, so tritt das Bild derselben nicht leicht in Wettstreit mit dem erst erwähnten Trugbilde. Ist es aber ein Gegenstand, der deutliche Conturen enthält, so zeigt sich der Wettstreit der Conturen. Fixirt man z. B. ein Tapetenmuster der Wand und bringt in die Richtung der einen Gesichtslinie einen Finger, so erscheint letzterer in ungleichseitigen Doppelbildern, welche anfangs das correspondirend abgebildete Tapetenmuster unterdrücken können. Achtet man aber länger und genauer auf das in der Median-

ebene gelegene Fingertrugbild, so sieht man das Tapetenmuster gleichsam durch das Fingerbild durchscheinen. Die Umrisse des Fingerbildes bleiben meist im Wettstreite siegreich; im Innern desselben aber siegen die Conturen des Tapetenmusters. Zwischendurch verdrängt letzteres auch einmal das ganze Trugbild des Fingers. Da die Augen für die Entfernung der Tapete und nicht des Fingers accommodirt sind, so sind die Conturen des Tapetenbildes scharf, die des Fingerbildes verwaschen und deshalb gegen erstere im Nachtheil beim Wettstreite. Wenn Jemand nun überdies dem Tapetenmuster, welches er fixirt, seine Aufmerksamkeit zuwendet, so entgeht ihm leicht das Trugbild des Fingers ganz, obwohl es sich auf der Stelle des directen Sehens abbildet. Das andere Trugbild des Fingers liegt sehr seitwärts und wird um so leichter übersehen.

Die Richtung, in welcher die Trugbilder erscheinen, ist unabänderlich durch das Gesetz der identischen Sehrichtungen gegeben. Man braucht sich nur beide wirkliche Netzhautbilder auf die Netzhaut des imaginären Einauges in der oben erörterten Weise übertragen zu denken, so dass alle Deckstellen zusammenfallen, und die Richtungslinien des Einauges als die Sehrichtungslinien gelten zu lassen: so hat man für jedes Trugbild die zugehörige Sehrichtung. Das Einauge oder das Centrum der Sehrichtungen muss man sich dabei in die Medianebene des Kopfes, oder wenn man sich durch einseitigen Gebrauch eines Auges oder aus andern Gründen (s. S. 391) eine andere Art der Localisirung angewöhnt hat, entsprechend seitlich in den Kopf verlegt denken. Auf die Lage des Centrums der Sehrichtungen kommt hier vorerst nicht viel an; wenn es auch eine anomale Lage hat, so bleibt doch dabei das System der Sehrichtungslinien in sich ganz unverändert, und innerhalb dieses Systems sind den Trugbildern ihre Sehrichtungslinien angewiesen.

Wenn man einem Laien die Aufgabe stellt, ein entferntes Object zu fixiren und von der rechten Seite her den rechten Zeigefinger gerade zwischen sich und das fixirte Object d. h. in die Medianebene zu bringen, so wird er ihn stets in die rechte Gesichtslinie statt in die Medianebene bringen; soll er den linken Zeigefinger von links her in die Medianebene bringen, so bringt er ihn in die linke Gesichtslinie. Der Finger erscheint dabei in ungekreuzten Doppelbildern; doch muss man Laien meist erst darauf aufmerksam machen, dass ausser dem scheinbar in der Medianebene liegenden Finger noch ein zweiter seitwärts zu sehen ist; denn wegen seiner excentrischen Lage wird dieses zweite Fingertrugbild von Laien meist übersehen. Fig. 28 versinnlicht den Versuch.

In *b* liegt der Blickpunkt, in *a* ein rechts davon gelegenes Object, in *d* der Finger auf der Gesichtslinie *db* des rechten und der Richtungslinie *da* des linken Auges; *w* ist das Centrum der Sehrichtungen, *wβ* die Hauptsehrichtung, auf welcher das eine Trugbild des Fingers in *δ'* und dahinter das fixirte Object in *β* erscheint. Das zweite Fingertrugbild erscheint in *δ* und dahinter in *α* das ebenfalls indirect gesehene Object *a*.

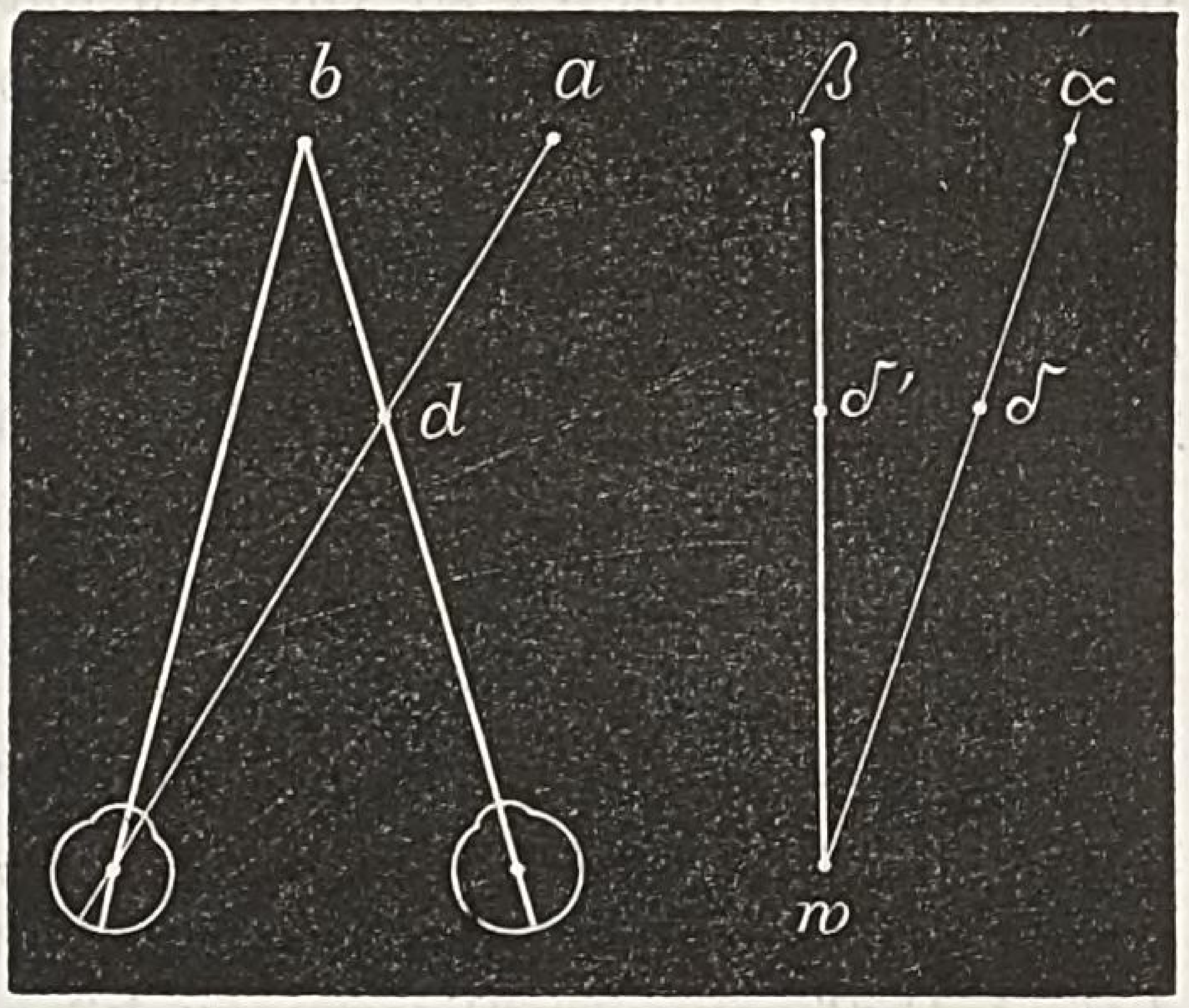


Fig. 28.

Mit der Linie oder Richtung, in welcher ein Trugbild oder Halbbild im Sehraum erscheint, ist noch nicht sein Ort auf dieser Linie oder seine scheinbare Ferne in dieser Richtung gegeben. Die Localisirung eines Trugbildes innerhalb der ihm zukommenden Sehrichtungslinie hat meist etwas Unsicheres und Unbestimmtes, um so mehr, je anhaltender man es unverrückten Blickes beachtet. Die im zweiten Abschnitte zu erörternden Erfahrungsmotive für die Localisirung werden auch für die scheinbare Ferne der Trugbilder mitbestimmend. Bringt man z. B. beide Zeigefinger in verschiedener Entfernung vom Gesichte in die Medianebene und fixirt den einen, so sieht man die Trugbilder des andern dauernd in einer Entfernung, welche der des wirklichen Fingers nahezu entspricht. Dasselbe gilt von anderen, uns aus Erfahrung genau bekannten Dingen, wie Hering [1] gegenüber der älteren Annahme, dass die Doppelbilder stets in gleicher Entfernung mit dem fixirten Objecte erscheinen, zuerst nachdrücklich betont hat. Fehlen anderweite Motive der Localisirung, so werden die Doppelbilder wenigstens im Beginne ihres Erscheinens nach denselben Gesetzen localisirt, welchen die Localisirung der disparat abgebildeten aber einfach gesehenen Objecte folgt (s. Cap. VI).

Wenn man eine kleine Lichtquelle sich auf einer Biconvexlinse spiegeln lässt, so sieht man zwei Spiegelbilder, deren eines näher liegt als das andere. v. Recklinghausen [2] benützte als Lichtquelle einen elektrischen Funken und sah dabei deutlich den einen Funken näher als den anderen, auch wenn der eine in Doppelbildern er-

1 Hering, Beiträge zur Physiologie II. § 57. 1862.
2 v. Recklinghausen, Ann. d. Physik CXIV. S. 170.

schien, weil seine Netzhautbilder zu disparat lagen, um ein einfaches Anschauungsbild auszulösen. HELMHOLTZ[1] liess einen Punkt der Wand in einer Entfernung von einigen Fussen fixiren und dabei ein Blatt steifen Papieres so vor den untern Theil des Gesichts halten, dass sein oberer Rand einige Zoll vor den Augen in ungefähr derselben Höhe lag. Der Papierschirm verdeckte dabei alle Gegenstände, die vor dem Beobachter unterhalb seiner Blickebene lagen. Schob er nun von unten her einen geraden Draht in solcher Entfernung in die Höhe, dass er dem Beobachter in Doppelbildern sichtbar wurde, so erhielt derselbe sofort eine Vorstellung von der Entfernung des Drahtes, auch wenn er die Augen ganz unbewegt gelassen und den Draht nicht einfach gesehen hatte. Liess er den Beobachter nach dem verdeckten Theile des Drahtes greifen, wobei ihm die Hand selbst unsichtbar blieb, so traf er den Draht sogleich beim ersten Versuche. Um nicht aus der Dicke des Drahtes auf dessen Entfernung schliessen zu können, benütze man abwechselnd Drähte von verschiedener und unbekannter Stärke. Eine Verschmelzung disparater Bilder ist also gar nicht unbedingt nöthig, um binoculare Tiefenwahrnehmungen zu machen, vielmehr werden, auch wenn alle andern Motive der Localisirung fehlen, gekreuzte Doppelbilder vor, ungekreuzte hinter die Kernfläche localisirt, um so mehr, je grösser ihre Disparation ist. Bei haploskopischer Vereinigung einfacher Linearzeichnungen, welche zwei Projectionen eines nach der Tiefe sich erstreckenden Gegenstandes darstellen und nach der S. 393 gegebenen Regel entworfen sind, überzeugt man sich leicht, dass auch die nicht einfach gesehenen Theile der Doppelfigur gleichwohl diesseits oder jenseits der Kernfläche erscheinen. Um das Einfachsehen der disparaten Theile der beiden Bilder zu verhindern, giebt man beiden Zeichnungen verschiedene Farben, wie dies z. B. in der Fig. 29[2] der Fall ist.

Nur muss man sich dabei dem unmittelbaren Eindrucke hingeben und darf nicht bei länger anhaltender fester Fixirung über die Lage der beiden zusammengehörigen Trugbilder reflectiren: dann findet man sie bald unbestimmt. Das geschieht um so leichter, je disparater die beiden Halbbilder liegen. Hieraus erklärt sich die ältere irrige Annahme, nach welcher Doppelbilder stets in derselben Entfernung wie der fixirte Punkt erscheinen sollten. Gerade bei den haploskopischen Versuchen heften sich, wenn man Zeichnungen

1 HELMHOLTZ, Arch. f. Ophthalmologie X. 1. S. 28. 1864.

2 Entnommen aus HELMHOLTZ's Physiol. Optik. DOVE (Farbenlehre 1853) hat zuerst derartige Figuren zur Demonstration des binocularen Glanzes angegeben.

auf Papier anwendet, die Doppelbilder leicht an die der Papierfläche entsprechende Kernfläche, weil man weiss, dass die Zeichnungen auf dem Papier liegen. Besser eignen sich zum Versuche auf Glas photographirte Projectionen, am Besten wirkliche Aussen-

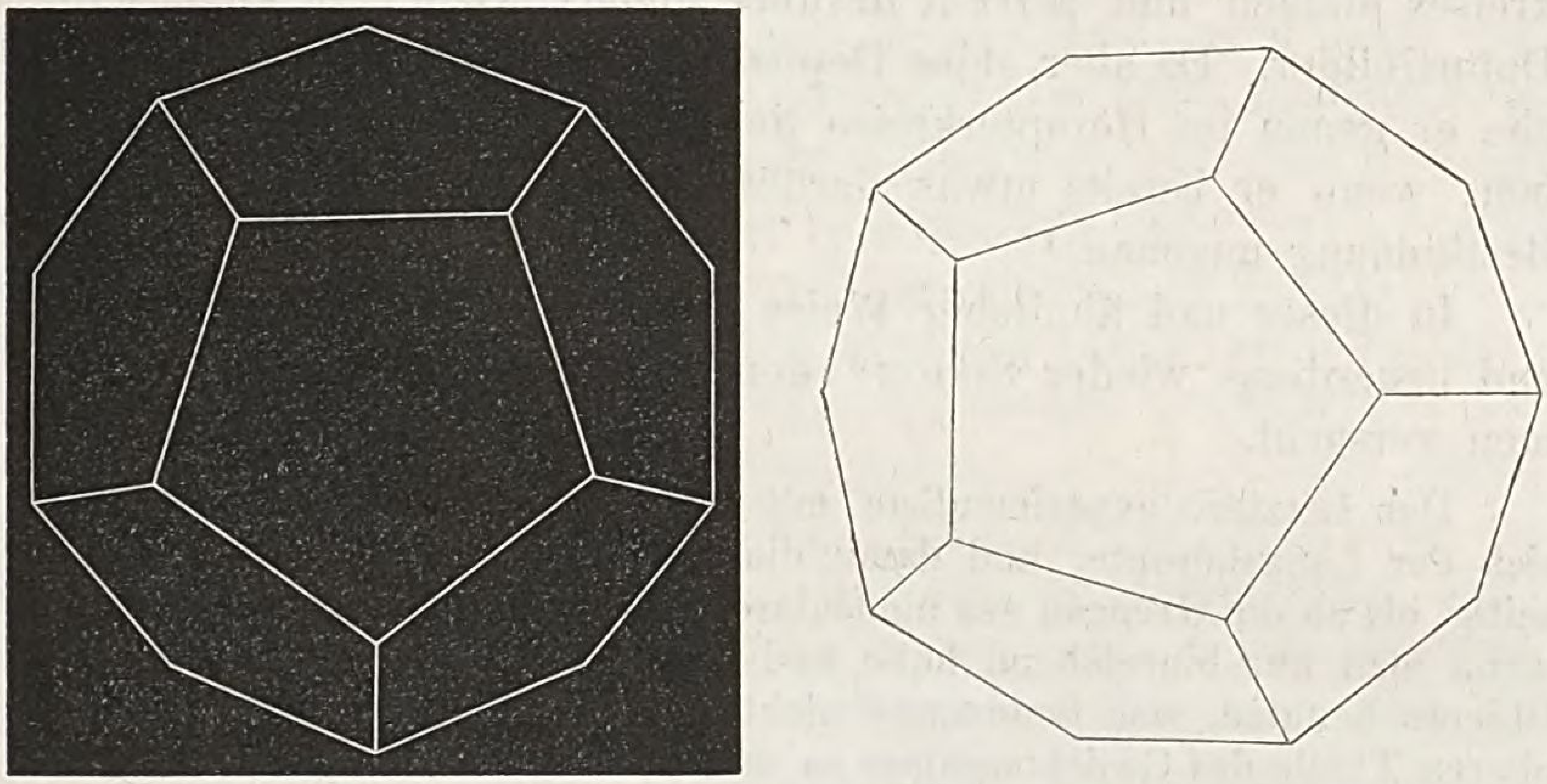


Fig. 29.

dinge, über deren Grösse und Ort man nichts vorweiss und welche man plötzlich in den binocularen Gesichtsraum vor oder hinter den Blickpunkt bringen lässt. Bei dem S. 408 beschriebenen Fallversuch sieht der geübte Beobachter die fallende Kugel, wenn ihre Fallbahn weit vom Blickpunkt nach vorn oder hinten abliegt, öfters doppelt, besonders wenn die Kugel gross und von einer Farbe ist, die stark vom Hintergrunde absticht. Gleichwohl sieht er die Doppelbilder v o r oder h i n t e r der Kernfläche. van der Meulen und van Dooremaal[1] haben sogar gefunden, dass, wenn dem einen Auge nur die obere, dem andern nur die untere Hälfte der Fallbahn sichtbar ist, man doch erkennt, ob die Kugel näher oder ferner als der Blickpunkt herabgefallen ist.

Es wurde schon im I. und IV. Capitel erwähnt, dass man vor Einführung der Substitutionsmethode das Doppel- oder Einfachsehen kleiner Objecte als Kriterium dafür gebrauchte, ob das Object im Horopter lag oder nicht, und auf diese Weise die Anordnung der Deckstellen zu bestimmen suchte. Bei der nöthigen Uebung im festen Fixiren und im Erkennen der Doppelbilder giebt diese Methode immerhin brauchbare Annäherungswerthe. Fixirt man, während die mittlen Querschnitte in der Blickebene liegen, einen nahen

1 van der Meulen u. van Dooremaal, Arch. f. Ophthalmologie XIX. 1. S. 137. 1873.

in der Medianebene gelegenen Punkt, und bewegt z. B. einen glänzenden Stecknadelkopf innerhalb der Blickebene in einer der Medianebene parallelen Bahn vom Gesichte weg, so erscheint er anfangs in ungleichseitigen Doppelbildern, wird in der Nähe des Horopterkreises einfach und zerfällt darüber hinaus wieder in gleichseitige Doppelbilder. Da aber seine Doppelbilder schon verschmelzen, noch ehe er genau im Horopterkreise liegt, und noch verschmolzen bleiben, wenn er bereits etwas darüber hinaus gelangt ist, so ist die Bestimmung ungenau.[1]

In dieser und ähnlicher Weise haben A. Prévost[2], Meissner[3] und neuerdings wieder Schön[4] den Horopter empirisch zu bestimmen versucht.

Der Letztere experimentirte mit Lichtflammen und giebt an, dass sich der Längshoropter und damit die Correspondenz der Netzhäute allseitig bis an die Grenzen des binocularen Gesichtsraumes nachweisen lasse, wenn man nur hinreichend helle und vom Grunde genügend abstechende Objecte benutze, was Schoeler[5] nicht gethan und deshalb für die peripheren Theile des Gesichtsraumes so unsichere Ergebnisse gewonnen habe.

Meissner hat bei derartigen Versuchen auch zuerst auf die gegenseitige Neigung der Doppelbilder einer geraden Linie geachtet und dieselbe zur Beurtheilung der Lage correspondirender Netzhautmeridiane benützt, eine Methode, die später in verbesserter Weise zur Untersuchung der Augenstellungen vielfach angewandt worden ist.

Sehr häufig ist der Fall, dass von einem Aussendinge nur ein Trugbild gesehen wird, entweder weil das andere sehr excentrisch liegt und deshalb gar nicht beachtet wird, oder weil das andere im Wettstreite unterliegt oder endlich, weil trotz binocularem Sehen der entsprechende Gegenstand nur unocular gesehen wird. Letzteres ist der Fall, wenn ein ferneres Object dem einen Auge durch ein näheres verdeckt wird, während es dem andern Auge sichtbar bleibt, oder wenn das Object ausserhalb des binocularen Gesichtsraumes liegt und nur einem der beiden seitlichen unocularen Theilen des Gesichtsraumes angehört.

Schön[6] giebt von den einseitigen Doppelbildern an, dass das Trugbild desjenigen Auges, auf dessen Seite sich auch das doppelterscheinende Object befindet, gegenüber dem andern fast immer im Vortheil sei und vor-

1 Unvergleichlich genauer wird sie, wie wir sahen, wenn man nicht das Einfachsehen zum Merkmal der Lage im Horopter macht, sondern die scheinbare Entfernung verglichen mit der des fixirten Punktes (siehe Cap. VI. S. 402).

2 A. Prévost, Sur la théorie de la vision binoculaire p. 20. Genève 1843.

3 Meissner, Beiträge zur Physiologie des Sehorgans. Leipzig 1843.

4 Schön, Arch. f. Ophthalmologie XXIV. 1. S. 51. 1878.

5 Schoeler, siehe oben S. 364.

6 Schön, Arch. f. Ophthalmologie XXII. 4. S. 31 und XXIV. 1. S. 27.

wiegend beachtet werde. Er erklärt dies aus der verschiedenen Erregbarkeit der verschiedenen Netzhauttheile und insbesondere daraus, dass die Erregbarkeit auf dem temporalen Theile der Netzhaut rascher vom Centrum nach der Peripherie abnehme als auf dem nasalen.

Viel seltener als das Doppelsehen des wirklich Einfachen ist das Einfachsehen des wirklich Doppelten, wenn nicht letzteres wie bei den haploskopischen Versuchen absichtlich herbeigeführt wird. Blickt man durch ein enges Drahtgitter oder das Geflecht eines Rohrstuhles nach einem dahinter gelegenen Gegenstand, so empfindet man Unsicherheit und Unbehagen, solange nicht beide Netzhäute correspondirend liegende Bilder des Gitters empfangen, welchenfalls aber je zwei wirklich verschiedene Maschen des Gitters haploskopisch verschmolzen werden. Hierbei kann, wie H. Meyer[1] zeigte, das Gitter, statt an seinem wirklichen Orte, in der Entfernung des betrachteten Objectes erscheinen. Hält ein im Doppelsehen nicht geübter Beobachter, während er in die Ferne blickt, in jede Gesichtslinie eine verticale Stricknadel, so verschmelzen ihm ihre beiden auf den mittlen Längsschnitten liegenden Bilder haploskopisch und er glaubt eine einzige Nadel in der Medianebene zu sehen. Der Geübte erkennt freilich rechts und links noch ein Trugbild der Nadeln. Denn jede derselben giebt zwei gekreuzte Trugbilder, da aber das linke Trugbild der rechten und das rechte der linken Nadel an derselben Stelle des Sehraumes zu erscheinen haben, so verschmelzen sie zu einem Sehdinge, das in der Medianebene erscheint.

Solche durch Zusammenfallen zweier nicht zusammengehöriger Trugbilder entstehende Sehdinge werden je nach den Umständen entweder in eine Entfernung localisirt, die den beiden zugehörigen wirklichen Dingen annähernd entspricht oder aber in die Entfernung, welche eben der Blickpunkt hat. Drähte oder Fäden z. B. sieht man bei dem eben beschriebenen Versuch manchmal in grosser Entfernung wie dicke Stangen oder Taue. Bringt man dagegen beiderseits einen Zeigefinger auf je eine der parallel liegenden Gesichtslinien, so erscheint das aus der Verschmelzung der beiden inneren Trugbilder entstandene Bild des Fingers ungefähr in der Entfernung der beiden wirklichen Finger. Legt man auf den Tisch zwei gleiche Münzen oder Briefmarken mit einem gegenseitigen queren Abstande, der dem der Augen gleich ist, und richtet jede Gesichtslinie auf die Münze ihrer Seite, so sieht man drei Münzen auf dem Tische, deren mittle aus der Verschmelzung der beiden Trugbilder entstanden ist. Aber diese Münze erscheint ebensowenig als der Tisch in jener grossen

1 H. Meyer, Arch. f. physiol. Heilk. I. S. 316. 1862.

Entfernung, in welcher der Blickpunkt liegt. Richtet man jedoch die linke Gesichtslinie auf die rechte, die rechte auf die linke Münze, so dass der Blickpunkt in der Mitte zwischen Augen und Tisch liegt, so kann man eine kleine Münze in der Gegend des Blickpunktes gleichsam in der Luft schweben sehen, wobei der Tisch entweder an seiner alten Stelle bleibt oder mit heranrückt; oder aber man sieht wieder alle drei Münzen auf dem Tische, ohne dass derselbe näher gerückt scheint. Je nachdem die Localisirung nach der Dimension der Tiefe mehr durch die Lage des Blickpunktes oder durch andere Motive bestimmt wird, tritt die eine oder die andere Art der Auslegung ein (vergl. Abschnitt II). —

Es sind von VOLKMANN[1] nach der haploskopischen Methode Messungen der grössten Disparation gemacht worden, bei welcher zwei gleiche aber disparate Netzhautbilder von Linien oder Punkten noch einfach gesehen werden. Er bediente sich dabei eines als Tachistoskop[2] bezeichneten Apparates. Ein der Frontalebene des Beobachters paralleler Schirm verdeckt anfangs die Doppelzeichnung. Lässt man den Schirm aber herabfallen, so wird durch einen Ausschnitt desselben die Zeichnung einen Augenblick sichtbar, um sofort wieder verdeckt zu werden. Schon oben wurde erwähnt, dass die Grösse der zum Doppelsehen nöthigen Disparation sehr von der Uebung im festen Fixiren und indirecten Sehen abhängt. Insbesondere wird, wie sich auch bei VOLKMANN zeigte, durch die auf das Unterscheiden disparater Bilder gerichtete Uebung das Vermögen zum Doppelsehen derselben sehr vergrössert. Wer dasselbe erworben hat, vermag manche projectivische Doppelzeichnung, die er früher leicht in allen Theilen einfach sah, nachher nicht mehr durchaus zu verschmelzen. Das Ergebniss derartiger Messungen hängt also wesentlich von individuellen Bedingungen ab. Längs disparate Bilder werden nach VOLKMANN leichter doppelt gesehen, als Bilder von gleich grosser querer Disparation. Dasselbe fand DONDERS[3], welcher bei Beleuchtung mit dem electrischen Funken experimentirte. Die instantane Beleuchtung, wie überhaupt die nur flüchtige Beobachtung begünstigt das Einfachsehen disparater Bilder. Bei dem S. 408 beschriebenen Fallversuche sehen Ungeübte die fallende Kugel noch einfach, wenn die Disparation der Netzhautbilder 3 mm. und mehr beträgt, wobei die richtige Localisirung der Kugel beweist, dass wirklich beide Netzhäute bei der Wahrnehmung betheiligt waren. SCHOELER[4] fand

1 VOLKMANN, Arch. f. Ophthalmologie V. 2. 1859.
2 Derselbe, Ber. d. sächs. Ges. d. Wiss. 1859.
3 DONDERS, Arch. f. Ophthalmologie XIII. 1. S. 12. 1867.
4 SCHOELER, ebenda XIX. 1. S. 20. 1873.

bei binocularer Betrachtung stereoskopischer Figuren mit instantaner Beleuchtung 2 mm. quere Disparation der Netzhautbilder als das Maximum, bei welchem dieselben noch verschmolzen wurden, während dasselbe für VOLKMANN nur etwa 1/5 mm. betrug. Alle derartigen Zahlen gelten nur für die besonderen Bedingungen des Versuches. Sind die disparaten Netzhautbilder zweier Linien oder Punkte, welche haploskopisch vereinigt werden sollen, nicht ganz gleich, z. B. die eine Linie stellenweise unterbrochen oder mit einem Zeichen versehen, oder sind beide Linien oder Punkte von verschiedener Farbe, so werden sie leichter doppelt nebeneinander gesehen, wie PANUM[1] und VOLKMANN (l. c.) gezeigt haben. Fig. 29 lehrt dies ebenfalls. —

Gegenüber der Behauptung, dass man ein auf Deckstellen liegendes Nachbild unter Umständen doppelt sehen könne, hat HERING[2] die schon oben erwähnte Behauptung JOH. MÜLLER'S, dass dies nie der Fall sei, ausführlich vertheidigt. Das auf den Netzhautmitten liegende Nachbild z. B. bleibt immer einfach, auch wenn man es nicht in den Blickpunkt localisirt. Man lege auf dieses Blatt eine kleine schwarze Scheibe und fixire ihren Mittelpunkt anhaltend. Dann mindere man die Convergenz der Gesichtslinien, als ob man ein hinter diesem Buche gelegenes Object fixiren wolle: man sieht dabei das einfache Nachbild auf der Schrift liegen, diese selbst freilich doppelt. Wenn z. B. die Gesichtslinien nach dem hinter dem Buche liegenden Punkte *b* (Fig. 30) convergiren, so erscheint gerade vor uns in der scheinbaren Entfernung des Papieres *p p*, d. h. ungefähr in *k*, erstens das Wort *w*, auf welches die linke Gesichtslinie, zweitens das Wort *w'*, auf welches die rechte Gesichtslinie gerichtet ist, und drittens das Nachbild. Die Buchstaben der beiden Worte liegen dabei mit einander im Wettstreite.

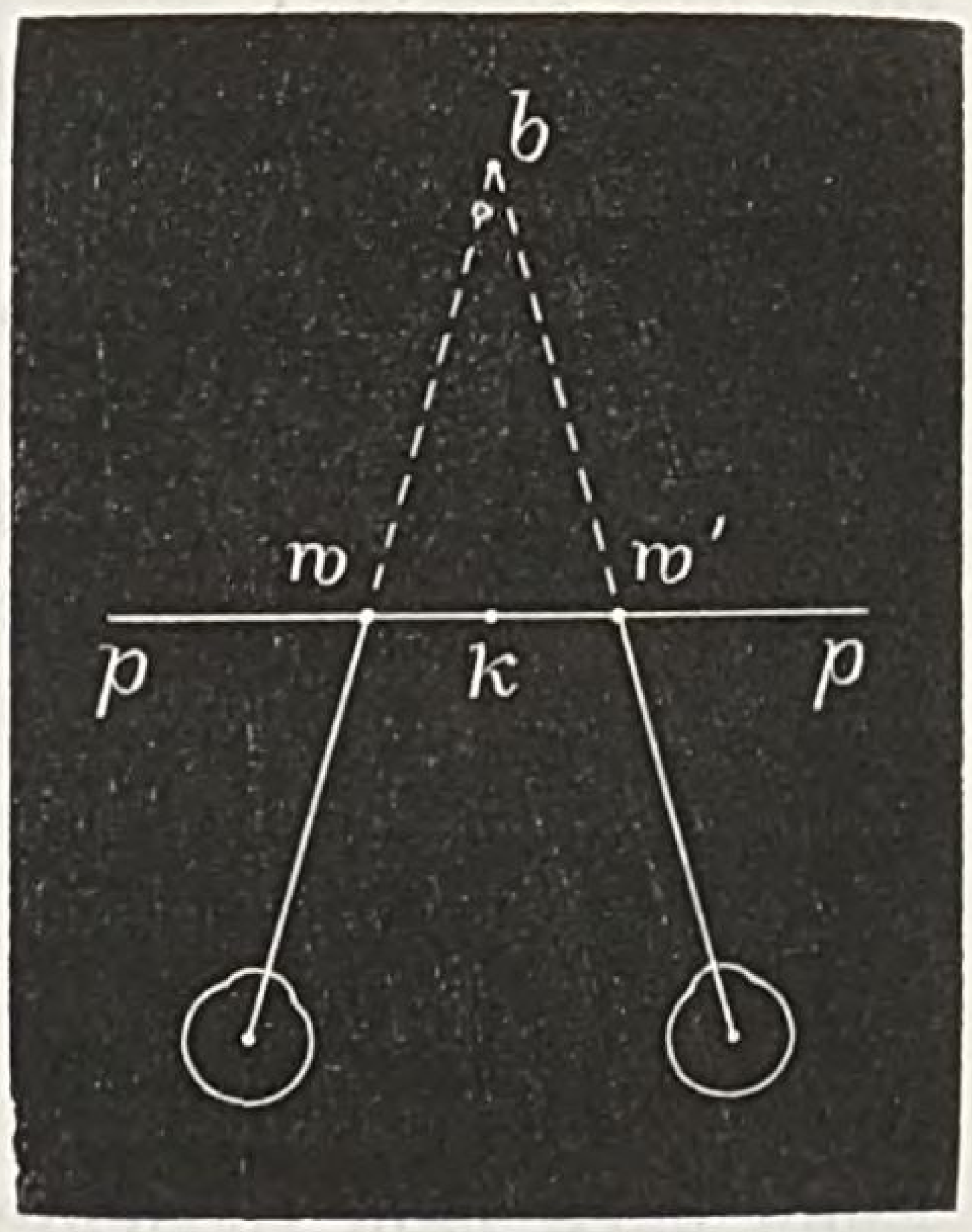


Fig. 30.

Fixirt man längere Zeit ein verticales schwarzes Band auf einer weissen Wand aus grosser Entfernung, so bildet sich dies Band beiderseits sehr annähernd auf den mittlen Längsschnitten ab und erzeugt daselbst ein Nachbild. Blickt man nun mit dem linken Auge auf die Mitte eines nahe an's Gesicht gebrachten horizontalen kleinen Blattes, so scheint das Nachbild auf demselben nicht median gerade-

1 PANUM, Das Sehen mit zwei Augen S. 64. Kiel 1858.
2 HERING, Beiträge zur Physiologie II. § 53. 1862.

aus, sondern etwas nach rechts zu verlaufen; fixirt man die Mitte des Blattes mit dem rechten Auge, so verläuft das Nachbild etwas schräge nach links. Fixirt man aber die Mitte des Blattes mit beiden Augen zugleich, so verläuft das Nachbild geradeaus und erscheint einfach auf der Durchschnittslinie der Medianebene und des Blattes. Achtet man nun zugleich auf die seitlichen Ränder des Blattes, so erkennt man, dass dieselben in schiefwinklig sich kreuzenden Doppelbildern erscheinen. Beim einäugigen Sehen bildet sich nämlich das Blatt im linken Auge mit anderer perspectivischer Verzerrung ab als im rechten, und das Nachbild hat im linken Netzhautbilde zu den Rändern des Blattes eine etwas andere relative Lage als im rechten Netzhautbilde. Entsprechend scheint uns, einäugig gesehen, das Nachbild eine verschiedene Lage auf dem Blatte zu haben, je nachdem wir mit dem linken oder mit dem rechten Auge sehen. Wir achten also dabei mehr auf die relative Lage des Nachbildes auf dem Blatte als auf seine absolute, d. h. seine Lage zur Medianebene.

Wheatstone, welcher zuerst festgestellt hat, dass man die Bilder disparater Stellen an demselben Orte sehen könne, zog daraus den Schluss, dass man auch umgekehrt die Bilder correspondirender Stellen nebeneinander sehen könne. Wundt [1], Nagel [2], Helmholtz [3] haben dem beigestimmt, Hering dagegen hat behauptet, es komme nie vor, dass man zwei auf Deckstellen liegende Bilder im Sehraume nebeneinander sehe; nur hintereinander, d. h. auf derselben Sehrichtungslinie könne man sie sehen.

Man färbe ein steifes Blatt Papier zur rechten Hälfte roth, zur linken grün und mache auf die Mitte der geraden Grenzlinie beider Farben einen schwarzen Punkt. Dieses Blatt halte man so vors Gesicht, dass die Grenzlinie der Farben in die Medianebene, und der schwarze Punkt, der als Fixationspunkt dient, in die Höhe der Augen zu liegen kommt. Neigt man nun das Papier mit dem oberen Ende nach dem Gesichte, so sieht man die Grenzlinie einfach und der Wirklichkeit annähernd entsprechend geneigt, falls die Neigung des Papieres nicht zu stark ist und man nicht Uebung im Doppelsehen disparater Bilder hat. Das Analoge sieht man, wenn man die beiden perspectivisch verzogenen Zeichnungen eines solchen Blattes, wie sie Fig. 31 darstellt, haploskopisch vereinigt.

Wenn nun, sagt Helmholtz, die Fixationspunkte f und f' auf

1 Wundt, Ztschr. f. rat. Med. (3) XII. S. 227. 1861.
2 Nagel, Das Sehen mit zwei Augen S. 78. 1861.
3 Helmholtz, Physiol. Optik S. 736.

die Netzhautcentren fallen, so werden auch je zwei gerade darüber gelegene Punkte, wie z. B. die auf der Zeichnung Fig. 31 durch Kreuzchen markirten, auf Deckstellen zu liegen kommen. Auf den zum Versuche benutzten farbigen Flächen sollen freilich diese beiden Punkte durch nichts von ihrer Umgebung verschieden sein. Sieht

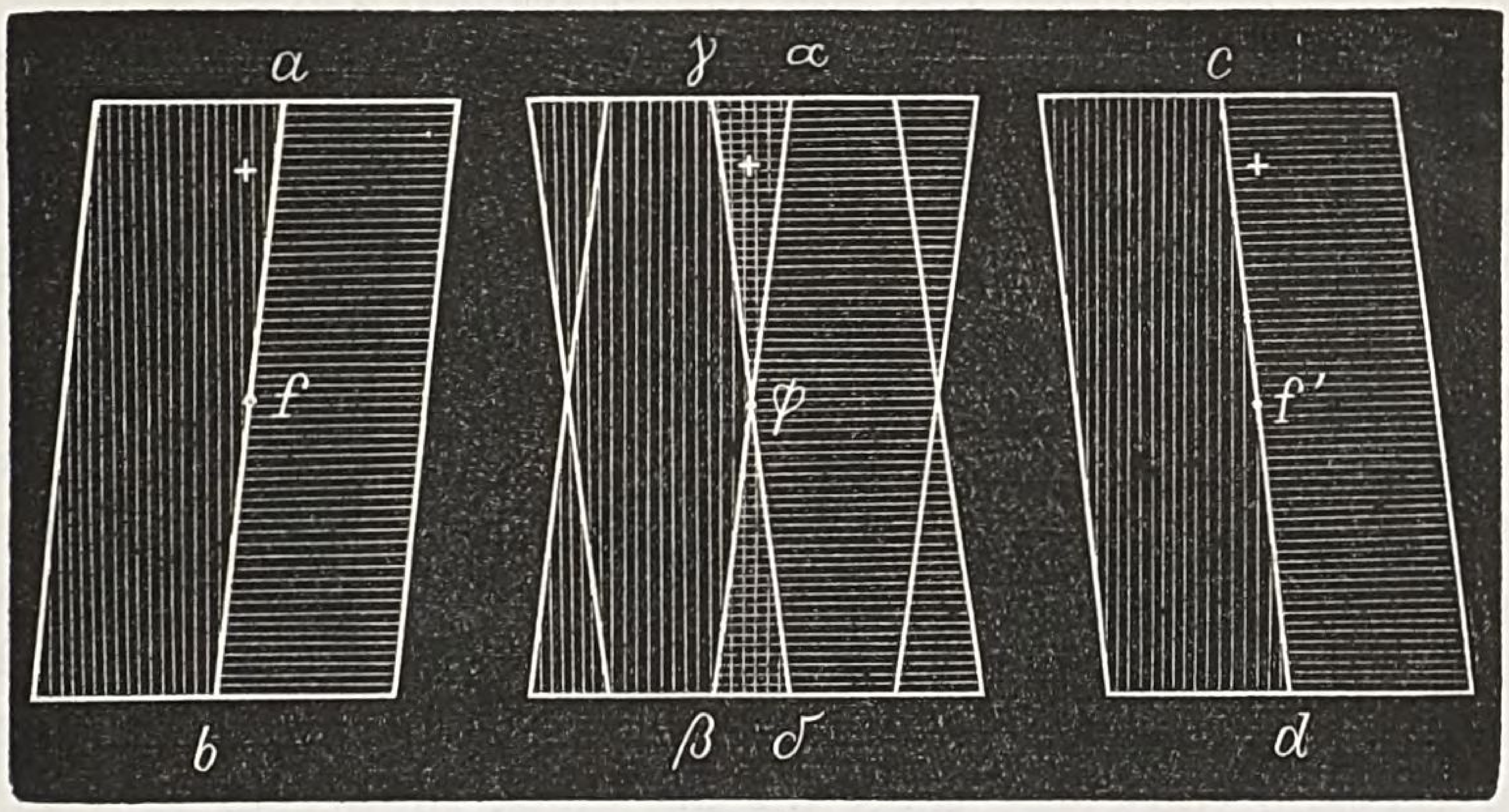


Fig. 31.

man nun die Grenzlinien *ab* und *cd* als eine einfache und mit dem oberen Ende nach vorn geneigte Linie, so wird der durch das Kreuzchen bezeichnete Punkt der grünen Halbfläche nach links, der correspondirende Punkt der rothen Halbfläche nach rechts von der Grenzlinie beider Flächen erscheinen, und die beiden Punkte werden also auf zwei verschiedenen Stellen des Sehfeldes gesehen, obwohl die entsprechenden Punkte der beiden Netzhautbilder auf Deckstellen liegen.

Wer im Unterscheiden disparater Bilder geübt ist, sieht freilich die Grenzlinie doppelt, wie es das Mittelbild der Fig. 31 darstellt, die beiden durch die Kreuzchen bezeichneten Punkte erscheinen ihm an demselben Orte im Sehfelde, und es zeigt sich daselbst wie überhaupt in den beiden Dreiecken $\gamma \varphi \alpha$ und $\beta \varphi \delta$ der Wettstreit der Farben oder eine Mischfarbe. Aber sofern Einer die Grenzlinie einfach sieht, trifft doch, so scheint es, die oben gemachte Auseinandersetzung von Helmholtz zu.

Indess ist dies nur die eine der beiden hier möglichen Auffassungen. Die andere ist die, dass beim Einfachsehen der Grenzlinie die den beiden Dreiecken $\alpha \varphi \gamma$ und $\beta \varphi \delta$ entsprechenden Empfindungen überhaupt gar nicht ins Bewusstsein treten. Die scheinbare Lage der Dinge hängt von der scheinbaren Lage ihrer Umrisse ab, und die Empfindung oder Farbe, welche die Umrisse ausfüllt,

folgt stets der Lage der letzteren. Ein kreisförmiges Nachbild z. B. wird elliptisch, wenn es auf einer zur Blickebene stark geneigten Ebene gesehen wird u. s. f. Die Empfindung erweist sich bei den verschiedenen Auslegungen, welche ein Netzhautbild erhalten kann, dehnbar wie Kautschuk. So folgt auch die der Grenzlinie $\alpha\beta$ nach rechts anliegende rothe und die der Grenzlinie $\gamma\delta$ nach links anliegende grüne Empfindung dieser Grenzlinie in ihre durch die haploskopische Verschmelzung gegebene mediane Lage. Die den Dreiecken $\alpha\varphi\gamma$ und $\beta\varphi\delta$ entsprechenden Theile des Netzhautbildes werden unterdrückt, falls sie, wie hier angenommen wurde, ganz gleichartig sind und nichts Unterscheidbares, insbesondere keinerlei Punkte oder scharfe Conturen enthalten. Bringt man auf den farbigen Flächen, so wie auf Fig. 31, je ein Kreuzchen an, so sieht man bei der haploskopischen Verschmelzung ein einfaches Kreuzchen umgeben von der jeweiligen Mischfarbe, und wer dann bei fester Fixirung der Punkte f und f' die Grenzlinie noch einfach sähe, würde sie vor dem Kreuzchen sehen, als ob er das letztere durch eine geneigte Glasplatte sähe, die zur einen Hälfte aus rothem, zur andern aus grünem Glase besteht. Zwischen den beiden räumlichen Auslegungen, welche ein solches Doppelnetzhautbild gestattet, nämlich der stereoskopischen und der flächenhaften, findet beim Geübten häufig ein ähnlicher Wettstreit statt, wie der oben beschriebene zwischen den Conturen; bald tritt das nach der Dimension der Tiefe ausgedehnte einfache Bild ins Bewusstsein, bald wieder das flächenhafte doppelte.

Welche der beiden hier erörterten Auffassungen die richtige ist, muss dahin gestellt bleiben.

Es bliebe uns übrig, das Sehen von Bewegungen bei unbewegtem Blicke zu besprechen und endlich zu erörtern, in wie weit die Localisirung, insbesondere betreffs der scheinbaren Ferne und Grösse, noch durch andere Motive bestimmt wird, als die oben dargelegten. Diese Erörterungen aber werden zweckmässiger Weise im zweiten Abschnitte, welcher vom Sehen mit bewegtem Blicke handelt, am passenden Orte eingefügt werden.

Das Sehen mit unbewegten Augen ist im Grunde ein unnatürlicher Zustand, den wir unserm Sehorgane nur zum Zwecke wissenschaftlicher Untersuchung abnöthigen; sonst pflegen unsere Augen nur dann still zu stehen, wenn unsere Aufmerksamkeit dem Gesichtssinne nicht zugewandt ist; so oft wir wirklich sehen, bewegen wir auch fast immer die Augen.

ZWEITER ABSCHNITT.

Das Sehen mit bewegten Augen.

NEUNTES CAPITEL.

Die Bewegungen des Blickpunktes.

Beim gewöhnlichen Sehen ändert der Blickpunkt fortwährend seine Lage; denn um die Aussendinge möglichst vollständig kennen zu lernen, betrachten wir nacheinander alle Einzeltheile derselben und suchen dieselben möglichst scharf wahrzunehmen, was eben nur dadurch erreicht wird, dass wir ihre Bilder auf die beiden Netzhautcentren bringen. Bei kleinen Objecten genügt hierzu die blosse Drehung der Augäpfel in ihren Höhlen. Ist aber das betrachtete Aussending grösser, so benützen wir behufs der Bewegung des Blickpunktes auch Drehungen und Neigungen des Kopfes, weiterhin des Oberkörpers, endlich sogar Ortsveränderungen des ganzen Körpers.

Selten ruht unsere Aufmerksamkeit und damit unser Blick auch nur secundenlang auf einer Stelle, vielmehr springt sie von Punkt zu Punkt und ihren Sprüngen und Wanderungen folgt sklavisch der Blickpunkt, in dessen zweckentsprechender Bewegung wir vielleicht mehr Uebung haben, als in irgend welcher andern Bewegung, weil wir kein anderes Organ so anhaltend beschäftigen, wie das Sehorgan.

Wenn wir nicht eben mit der Betrachtung eines Gegenstandes beschäftigt sind, so stehen die Gesichtslinien fast immer nahezu symmetrisch zur Medianebene; die Convergenz der Gesichtslinien und die Neigung der Blickebene ist dabei je nach individueller Gewohnheit und nach anderen zufälligen Umständen verschieden. Wollen wir einen Gegenstand betrachten, so stellen wir uns ihm so gegenüber oder halten ihn so vors Gesicht, dass er symmetrisch zur Medianebene zu liegen kommt. Ist der Gegenstand fern, so drehen wir, je nachdem er über oder unter der horizontalen Hauptebene

liegt, den Kopf nach oben oder unten. Gegenstände, die wir mit der Hand halten, besehen wir mit etwas vorwärts geneigtem Kopfe; diese Haltung hat der Kopf insbesondere auch beim Lesen und Schreiben. Wird ein Object mit nach oben gewandtem Kopfe betrachtet, so bleibt die Blickebene nicht rechtwinklig zur Frontalebene des Kopfes, sondern ist auch relativ zum Kopfe gehoben; ist der Kopf im Interesse des Sehens nach unten gewandt, so ist auch die Blickebene relativ zum Kopfe gesenkt. Es ist also hierbei immer die Lage der Blickebene in Bezug auf die primäre Blickebene in demselben Sinne verändert, wie die Stellung des Kopfes in Bezug auf seine Primärstellung.

Im Allgemeinen können wir zwei Hauptarten des Sehens unterscheiden, nämlich das Fernsehen, wobei der Kopf durchschnittlich die Primärstellung einhält und die Gesichtslinien horizontal und parallel geradeaus gestellt sind, und das Nahesehen, wobei durchschnittlich der Kopf nach vorn geneigt und auch die Blickebene relativ zum Kopfe gesenkt ist, und die Gesichtslinien symmetrisch auf diejenige Entfernung convergiren, welche der individuellen mittlen Blick- oder Sehweite entspricht, d. i. der Entfernung, aus der wir mittle Druckschrift oder andere kleine Objecte zu betrachten pflegen. Gesichtslinien und Blickpunkt haben also beim Fernsehen eine andere Mittellage als beim Nahesehen. Aus dieser Mittellage schweift der Blick nach allen Richtungen heraus, um immer wieder zu derselben zurückzukehren.

Die Bewegung des Blickpunktes aus der Mittellage erfolgt zunächst durch Drehungen der Augen, dann des Kopfes, weiterhin des Oberkörpers und schliesslich durch Drehungen und Ortsveränderung des ganzen Körpers. Liegt der Zielpunkt der Bewegung dem jeweiligen Blickpunkte sehr nahe, so bewegen sich allein die Augen; ist aber von vornherein eine grössere Ortsveränderung des Blickpunktes beabsichtigt, so beginnt gleichzeitig mit der Drehung der Augen auch eine des Kopfes, so dass die Bewegung des Blickpunktes die Resultirende beider Bewegungen ist. Kommt es uns darauf an, ein vom jeweiligen Blickpunkte erheblich Abliegendes rasch deutlich zu sehen, so beginnt auch die Drehung des Oberkörpers gleichzeitig mit derjenigen der Augen und des Kopfes. Gleitet jedoch der Blick aus einer gegebenen Anfangslage entlang einer Geraden oder überhaupt in gleichbleibender Richtung langsam vorwärts, so dass der Blick Punkt für Punkt weiter schreitet, dann beginnt die Bewegung mit einer Drehung der Augen, darnach gesellt sich eine Drehung des Kopfes und schliesslich eine solche des Körpers hinzu.

Aus alledem ergiebt sich, dass es unter den gewöhnlichen Verhältnissen von der Stärke der Innervation abhängt, ob Kopf und Körper mit bewegt werden. Die Stärke der Innervation ist um so grösser, erstens je weiter der Zielpunkt der Bewegung von der Mittellage abliegt, zweitens je grösser der Drang ist, das neue Ziel rasch mit dem Blicke zu erfassen. Setzt die Innervation gleich mit einer gewissen Stärke ein, so wird auch sofort der Kopf beziehungsweise der Körper mitbewegt; entwickelt sie sich erst allmählich zu grösserer Stärke, so wird erst nachträglich der Kopf und der Körper in die Bewegung einbezogen.

Wenn man mit der Cigarre oder einem Bleistift im Munde liest oder schreibt, und nur einigermaassen im indirecten Sehen geübt ist, so kann man, wie Donders [1] erwähnt, jede die Blickbewegungen begleitende Kopfbewegung sehr leicht beobachten; denn die Doppelbilder des Bleistiftes bleiben unbewegt, so lange nur die Augen sich bewegen, verschieben sich aber relativ zur Schrift, sobald der Kopf die kleinste Bewegung macht. Man erkennt dann, dass man beim Lesen nur sehr kleine Blickbewegungen nicht mit dem Kopfe begleitet. Beim Schreiben, wobei man von Zeit zu Zeit die Hand weiter schieben muss, tritt gewöhnlich bei jeder solchen Verschiebung gleichzeitig eine Drehung des Kopfes ein. Der Antheil, den beim Nahesehen die Kopfbewegung an der Blickbewegung nimmt, ist nach allen Richtungen aus der Mittellage ungefähr derselbe.

Hat man den Kopf auf die Hand gestützt, so nimmt derselbe an der Blickbewegung viel weniger Antheil; man fühlt dann jede Kopfbewegung an der Stirn- und Handfläche.

Viel besser als an sich selbst macht man übrigens derlei Beobachtungen an Andern, die nicht wissen, dass sie beobachtet werden. Man findet dabei mancherlei individuelle Verschiedenheiten.

Ritzmann [2] hat auf Anregung von Donders mit Hülfe eines mit den Zähnen festgehaltenen Visirzeichens (s. u.) messende Versuche über den verhältnissmässigen Antheil der Kopfbewegung an der Blickbewegung angestellt, doch hatte seine Methode den Nachtheil, dass der Beobachter zugleich das Object der Beobachtung war, wobei, wie auch Ritzmann selbst hervorhebt, die Blickbewegungen leicht unnatürlich werden. Man müsste für solche Messungen, wenn sie reine Resultate geben sollten, eine Methode ausfindig machen, bei welcher die Versuchsperson gar nicht weiss, worum es sich han-

1 Donders, Arch. f. d. ges. Physiol. XIII. S. 399. 1876.
2 Ritzmann, Arch. f. Ophthalmologie XXI. (1) S. 131. 1875.

delt und auch nicht den Messapparat im Munde halten muss, wie dies bei Ritzmann's Methode der Fall ist.

Immerhin stimmten die Ergebnisse von Ritzmann im Allgemeinen gut mit dem, was die unmittelbare Beobachtung an Andern lehrt, und sie sind bisher die einzigen in Zahlen ausgedrückten. Er fand, dass die Kopfdrehungen der Entfernung der beiden Blickpunkte annähernd proportional zunahmen, dass die Kopfbewegungen schon bei den kleinsten Blickbewegungen auftraten, und dass die Betheiligung des Kopfes nicht nach allen Richtungen gleich gross war, am kleinsten bei der Blickbewegung nach unten. In Bezug auf letzteren Punkt ist aber zu betonen, dass Ritzmann ein verhältnissmässig fernes Gesichtsfeld benutzte und dabei, wie es scheint, nur mit einem Auge beobachtete, was, wie aus dem Folgenden hervorgehen wird, zu anderen Ergebnissen führen muss, als die Untersuchung beim Binocularsehen.

Ritzmann's[1] Methode war folgende: „An einem mit Gebissabguss versehenen Mundstück ragt ein leichtes Holzstäbchen in der Richtung der Axe des einen — hier des rechten — Auges nach vorn und ist hier so nach oben abgebogen, dass sein Endpunkt in die Höhe des Auges, also in die verlängerte Axe selbst fällt (siehe Figur 32). Dieses Ende ist das feste Visir (*V*). Von ihm geht senkrecht auf die Visiraxe ein Stück Kreisbogen aus Aluminium (*Al*) aus, auf der concaven Fläche in Grade eingetheilt, ca. 50° lang. Das Centrum, von dem aus dieser Kreis beschrieben ist, liegt über dem hinteren Ende des Stäbchens, und fällt bei richtiger, für jeden Untersucher erst zu bewerkstelligender Einstellung in den Drehpunkt des betreffenden visirenden Auges. Der Bogen entspricht daher einem durch den Fixirpunkt gehenden Meridiane des kuglig gedachten Blickfeldes, und zwar, da er um *V* drehbar ist, jedem beliebigen. Indem man nun den Aluminiumbogen auf den secundär fixirten Punkt einstellt, und die diesem entsprechende Gradzahl abliest, hat man ein Maass für die directe meridionale Entfernung dieses Punktes von dem dem festen Visir entsprechenden Punkte des Raumes. Jene Zahl giebt nämlich den Winkel an, um den sich das Auge drehen musste, um von einem zum andern zu gelangen. Der Winkel des Aluminiumbogens mit der Horizontalen, d. h. die Neigung des beide Punkte verbindenden Meridians gegen den Horizont, wird durch einen kleinen Zeiger auf einem

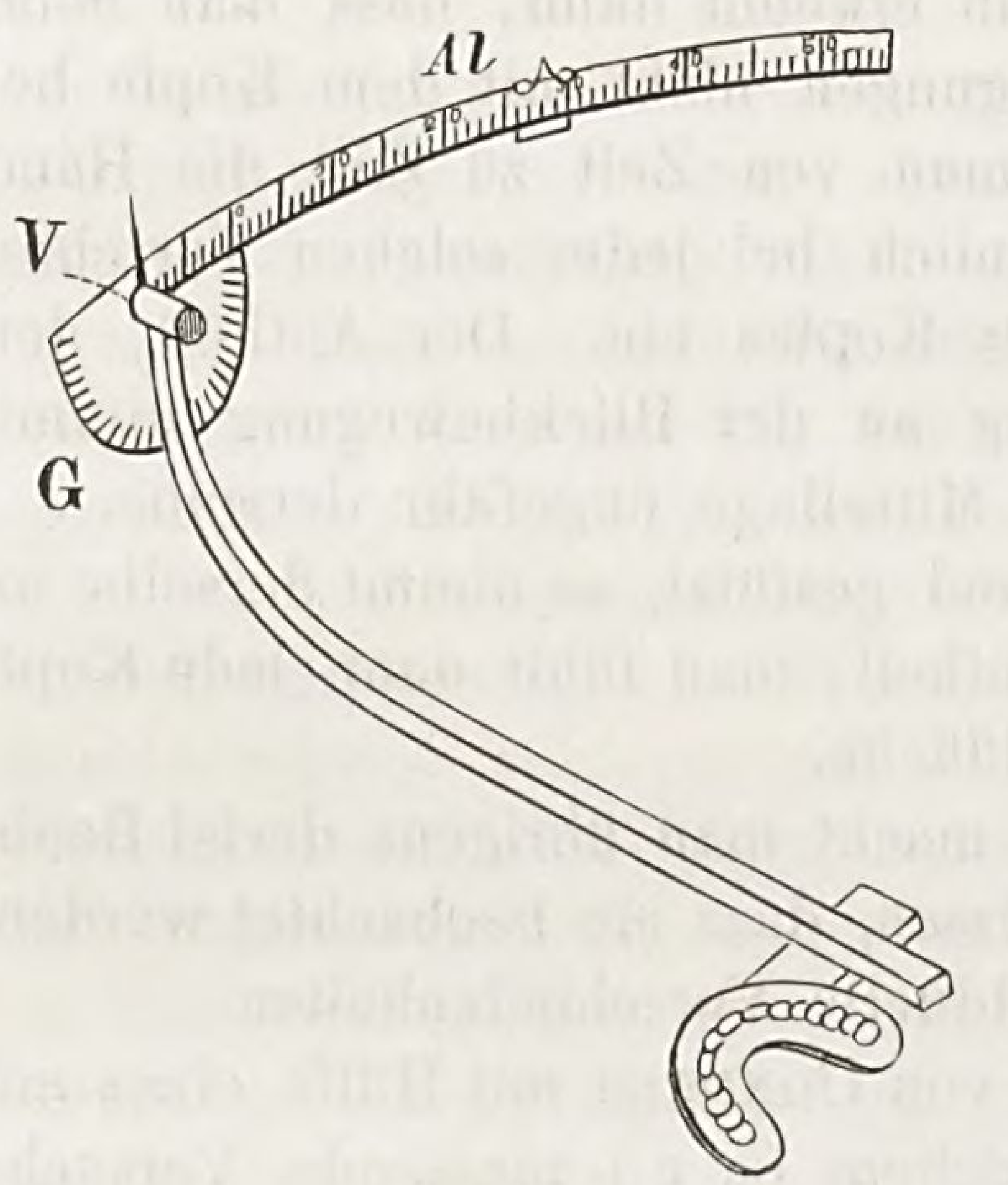


Fig. 32.

1 Ritzmann, Arch. f. Ophthalmologie XXI. 1. S. 133. 1875.

Gradbogen (G) angegeben. Durch diese beiden Werthe ist jeder Punkt in Bezug auf einen andern eindeutig bestimmt."

Wir haben bisher den Fall nicht besonders berücksichtigt, wo der Blick von einem näheren zu einem ferneren Punkte übergeht oder umgekehrt. Sehr selten wird es dabei vorkommen, dass beide Punkte in der Durchschnittslinie der Medianebene und der Blickebene, d. i. der Medianlinie, oder bei seitlich gerichtetem Blicke auf der ungefähren Halbirungslinie des Convergenzwinkels der Gesichtslinien liegen. In solchem Falle würde eine blosse Mehrung oder Minderung der Convergenz der Gesichtslinien zur Ausführung der nöthigen Blickbewegung genügen und keine Veranlassung zu begleitender Kopfbewegung sein. In den weitaus meisten Fällen aber liegt der nähere oder fernere Punkt zugleich auch über oder unter der augenblicklichen Blickebene, weil die Aussendinge meist auf einer Ebene angeordnet sind, die entweder horizontal oder mässig zur Horizontalen geneigt ist. Deshalb gesellt sich zur Mehrung der Convergenz meist auch eine weitere Senkung der Blickebene, und wenn der Zielpunkt der Bewegung seitwärts liegt, auch eine Wendung der Gesichtslinie nach rechts oder links. So verbinden sich mit gewissen Convergenzgraden gewisse Neigungen der Blickebene relativ zum Kopfe und gewisse Stellungen des letzteren, und wenn, wie z. B. beim Lesen während des Liegens, diese gewohnten Bewegungscombinationen nicht anwendbar sind, sondern durch andere ersetzt werden müssen, so fühlen wir uns gestört und angestrengt.

Die Linie, welche den Drehpunkt des Auges mit dem fixirten Punkte verbindet, ist von Helmholtz als **Blicklinie** benannt worden. Da jedoch, wie wir im folgenden Capitel sehen werden, streng genommen ein constanter Drehpunkt nicht nachgewiesen ist, und derselbe von den Einen auf der Hauptvisirlinie, von Anderen auf der Hornhautaxe angenommen wird, so erscheint es für jetzt genügend gerechtfertigt, wenn man kurzweg die Gesichtslinie zugleich als Träger des Drehpunktes ansieht.[1]

Die Stellung, welche die Gesichtslinien haben, wenn man bei der im nächsten Capitel zu definirenden Primärstellung des Kopfes horizontal geradaus in die Ferne sieht, heisst die **Primärstellung der Gesichtslinien** und der Punkt des Gesichtsfeldes, auf welchen eine oder beide Gesichtslinien in der Primärstellung gerichtet sind, der **primäre Fixations- oder Blickpunkt**.

1 Dem entsprechend haben wir auch im Obigen nicht die durch die beiden Hauptvisirlinien gehende Ebene als „Visirebene" von der Blickebene als der durch die beiden „Blicklinien" gelegten Ebene unterschieden, sondern die durch die beiden Gesichtslinien gehende Ebene die Blickebene genannt.

Denkt man sich bei fixirtem Kopfe die Gesichtslinie eines Auges aus der Primärstellung in allen durch letztere gehenden Bahnebenen möglichst weit abgelenkt, so werden alle diese Grenzlagen der Gesichtslinie in ihrer Gesammtheit eine unregelmässige Kegelfläche darstellen, deren Spitze im Drehpunkte liegt. Der von dieser Kegelfläche umschlossene Raum ist der Bewegungsraum der bezüglichen Gesichtslinie. Denkt man sich ferner in beliebiger Entfernung vom Auge eine, die Primärstellung der Gesichtslinie senkrecht durchschneidende Ebene, so wird dieselbe die genannte Kegelfläche in einer krummen Linie durchschneiden, welche die Grenze darstellt, bis zu welcher allerseits die Gesichtslinie des bezüglichen Auges in diesem ebenen Gesichtsfelde bewegt werden kann. Die von dieser krummen Linie umschlossene Fläche des ebenen Gesichtsfeldes ist das Bewegungsfeld der bezüglichen Gesichtslinie. Denkt man sich ein sphärisches Gesichtsfeld, dessen Krümmungsmittelpunkt im Drehpunkte liegt, so erhält man entsprechend ein sphärisch gekrümmtes Bewegungsfeld.

Nach Helmholtz[1] beträgt die stärkste ihm mögliche Ablenkung der Gesichtslinie nach rechts oder links 50°, nach oben oder unten etwa 45°.

Ganz andere Zahlen für die Ablenkung nach oben und unten ergeben sich jedoch aus der Abbildung (Fig. 33), welche Helmholtz von der Form

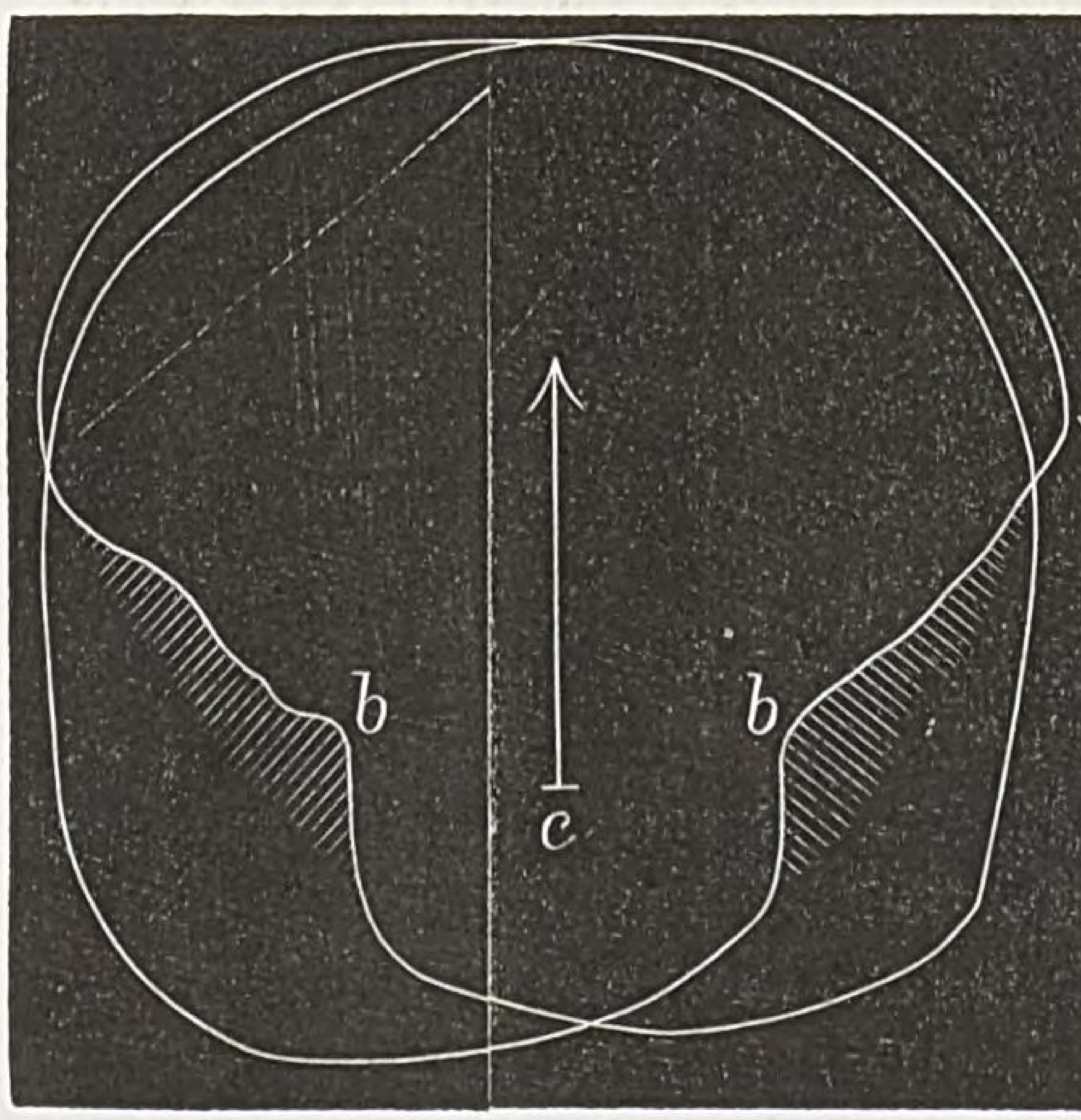


Fig. 33.

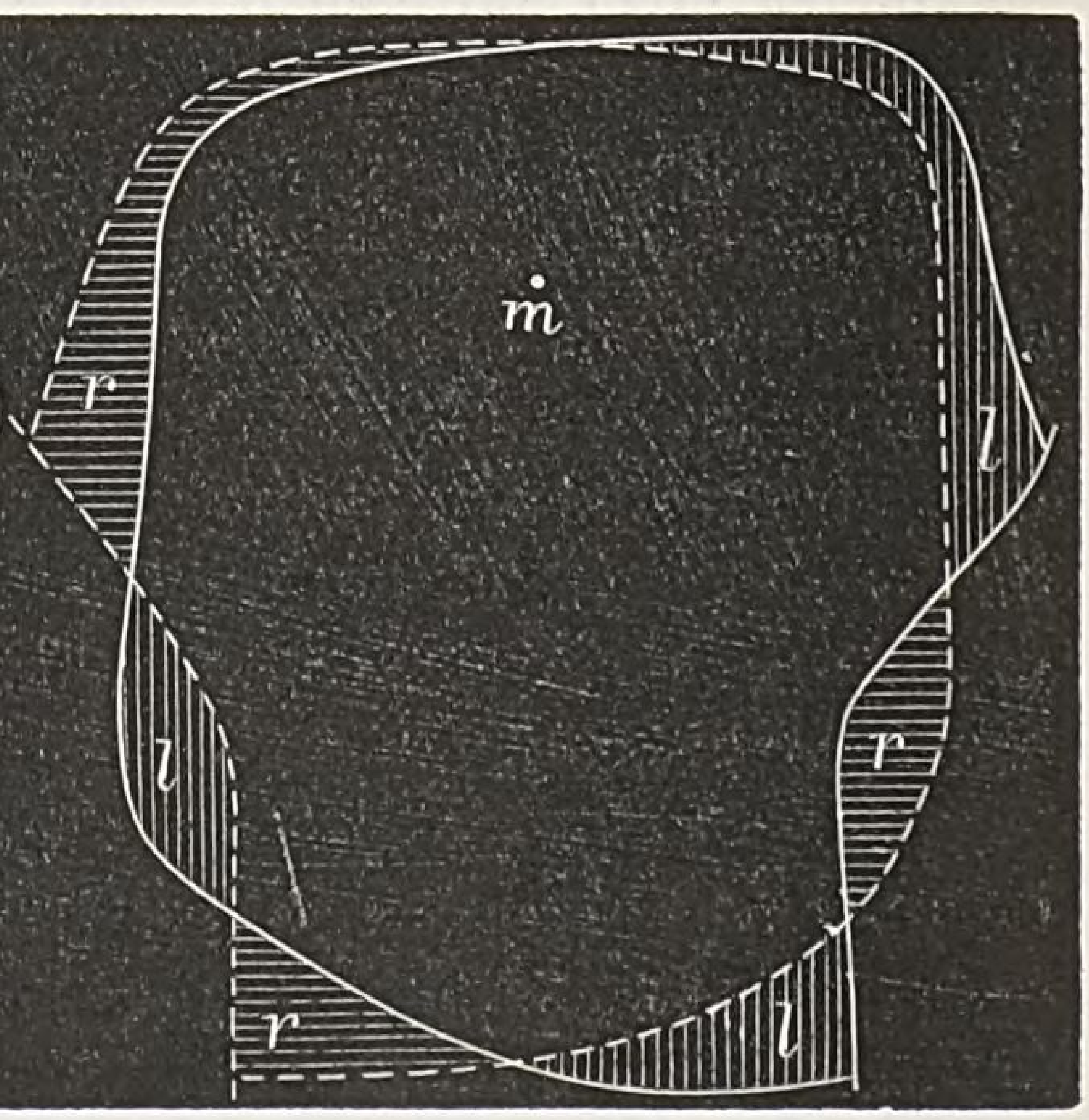


Fig. 34.

der ebenen Bewegungsfelder seiner beiden Gesichtslinien gegeben hat. Beide Felder sind übereinandergelegt, sodass die primären Punkte der-

1 Helmholtz, Physiol. Optik S. 459.

selben sich decken; letztere entsprechen in der Figur der Spitze des Pfeiles. Die Länge des Pfeiles entspricht dem angenommenen Abstande des Drehpunktes vom Bewegungsfelde. Nach unten hin ist das Bewegungsfeld jeder Gesichtslinie auf der inneren Seite eingeengt durch die hervortretende Nase *b, b*; was vom Nasenrücken noch fixirt werden kann, ist durch Schattirungen angedeutet.

Schuurmann[1] gab als Mittelwerthe für die maximalen Ablenkungen der Gesichtslinie emmetropischer Augen nach innen 45°, nach aussen 42°, nach oben 34°, nach unten 57°; für Myopen erwies sich die Excursionsfähigkeit um so geringer, je stärker die Myopie war, im Mittel nach innen 41°, nach aussen 38°; für Hypermetropen nach innen 47°, nach aussen 38°. Doch ist zu bemerken, dass nicht die Primärstellung, sondern nur eine horizontal geradaus gerichtete Stellung der Gesichtslinie als deren Mittellage angenommen war.

Volkmann[2], welcher nach der unten zu beschreibenden Methode von Hering untersuchte, fand als Mittel aus den Versuchsergebnissen an 3 Personen (W. Volkmann, R. Heidenhain u. O. Nasse) folgende Werthe:

nach oben 35°	nach unten 50°
nach innen 42°	nach aussen 38°
nach innen u. oben 38°	nach innen und unten 44°
nach aussen u. oben 38°	nach aussen u. unten 46°

Die Mittellage war auch hier nicht nothwendig die Primärstellung. Dasselbe gilt wohl auch von Aubert's[3] Messungen an seinem rechten Auge, welche ergaben:

nach oben 30°	nach unten 57°
nach innen 44°	nach aussen 38°

Küster[4] fand aus der Primärstellung n. i. 45°, n. a. 43°, n. o. 33°, n. u. 43 und 44°.

Hering[5] giebt für die maximalen Ablenkungen seiner Gesichtslinien aus der Primärstellung folgende Zahlen:

	linkes	rechtes Auge
nach oben	20°	20°
nach unten	62°	59°
nach innen	44°	46°
nach aussen	43°	43°

1 Schuurmann, Vergelijkend onderzoek. der bewegingen van het oog. Utrecht 1863. Dies Citat ist entnommen dem Handb. d. ges. Augenheilk. III. 1. Th. S. 233. Betreffs der von Schuurmann angewandten Methode muss auf das uns nicht zugängliche Original verwiesen werden.

2 A. W. Volkmann, Ber. d. sächs. Ges. d. Wiss. Mathem.-physik. Cl. S. 62. 6. Febr. 1869.

3 Aubert, Handb. d. ges. Augenheilk. II. 2. Th. S. 593. 1876.

4 Küster, Arch. f. Ophthalmologie XXII. (1) S. 174. 1876.

5 Hering, Die Lehre vom binocularen Sehen S. 44. 1868.

Er untersuchte nach folgender Methode: „Parallel zu den Verbindungslinien der Knotenpunkte wird eine vertikale Glastafel aufgestellt und auf derselben werden mit dickflüssiger Tusche oder Oelfarbe die beiden Punkte markirt, in welchen die (in der Primärstellung befindlichen) horizontalen Gesichtslinien die Glastafel durchschneiden. Hinter der Glastafel ist auf einem farbigen Grunde eine zum Grunde ungefähr complementär gefärbte kleine Scheibe oder Oblate angebracht, für Normalsichtige an einer möglichst weit entfernten Wand, für Kurzsichtige im Fernpunkte ihrer Augen. Diese Scheibe wird fest fixirt, so dass man ein dauerhaftes Nachbild von derselben bekommt; dann lässt man den Blick auf der fernen Wand in beliebiger Richtung so weit wandern, bis er nicht mehr weiter kann und das Nachbild auf der Wand stehen bleibt. In diesem Momente markirt man wieder auf der Glastafel den Punkt, in welchem sie von der Gesichtslinie durchschnitten wird. Dann kehrt man wieder zur farbigen Scheibe zurück, frischt das Nachbild auf und lässt nun die Gesichtslinie in einer anderen Richtung bis an die Grenze ihres Spielraumes wandern u. s. f. Auf diese Weise bekommt man auf der Glastafel eine Reihe von Punkten, welche man zu einer Curve verbindet, die den vertikalen Durchschnitt der Kegelfläche darstellt, von welcher der Spielraum der Gesichtslinie begrenzt wird. Nachdem man diese Curve für beide Augen erhalten hat, lässt sich aus ihr und aus der Entfernung der Glastafel vom Drehpunkte der Augen der Winkel finden, um welchen die Gesichtslinie in einer beliebigen Richtung aus der Primärstellung abweichen kann. Das Nachbild ist unentbehrlich, weil man sonst keine Controle darüber hat, ob die Gesichtslinie wirklich auf den Punkt, welchen man zu fixiren glaubt, eingestellt ist; man täuscht sich in dieser Beziehung bei starker Wendung des Auges sehr leicht.“ Die auf der Glastafel von HERING verzeichneten Curven sind in Fig. 35 verkleinert wiedergegeben, die unterbrochene Curve gehört dem rechten, die ausgezogene dem linken Auge an; die Linie zwischen Fig. 35 u. 36 stellt den in demselben Verhältnisse verkleinerten Abstand der Glastafel von den Drehpunkten dar, *l* und *r* sind die Punkte, in welchen die linke und die rechte Gesichtslinie in der Primärstellung die Glastafel durchschnitten. Nach innen und unten wird die Curve von dem Contour der Nase gebildet. Denkt man sich eine zur Primärstellung der Gesichtslinien verticale sehr entfernte Ebene und auf derselben für jedes Auge das Gebiet verzeichnet, innerhalb dessen die Gesichtslinie auf jener Ebene sich bewegen kann, so haben diese beiden unocularen Bewegungsfelder in der Verkleinerung die in Fig. 34 (S. 442) ange-

gebene gegenseitige Lage. Die Punkte r und l (Fig. 35) sind hier in einen Punkt m zusammengefallen, welcher den sehr fernen Fixationspunkt darstellt. Die Figur zeigt ebenso wie die Nebenfigur 33 von Helmholtz, dass das eine Auge auf Punkte eingestellt werden

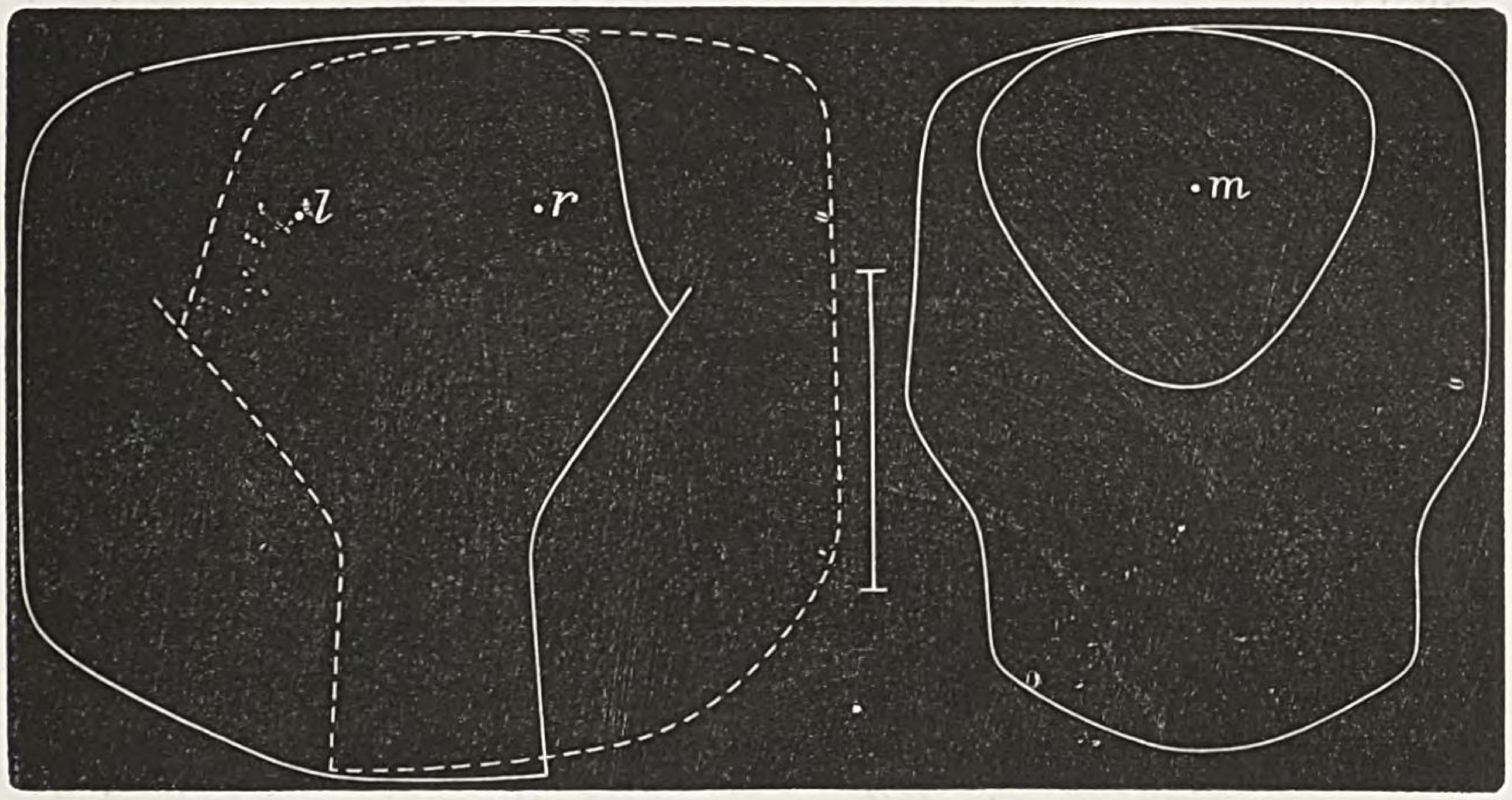


Fig. 35. Fig. 36.

kann, die das andere Auge nicht fixiren kann: die beiden unocularen Bewegungsfelder decken sich nicht. Diejenigen Theile, auf welche sich nur das linke Auge einstellen kann, sind vertical schraffirt und mit l bezeichnet, die nur dem rechten Auge zugänglichen horizontal schraffirt und mit r bezeichnet.

Nicht auf jeden Punkt des Aussenraumes, auf den jede Gesichtslinie für sich gerichtet werden kann, lassen sich beide Gesichtslinien zugleich richten, und der Spielraum des binocularen Blickpunktes, d. h. der binoculare Blickraum ist viel kleiner als der den beiden Bewegungsräumen der Gesichtslinien gemeinschaftliche Raum. Am deutlichsten zeigt sich dies, wenn die Blickebene erheblich gesenkt und zugleich ein fernes Object betrachtet wird; man überzeugt sich dabei leicht, dass das Einfachsehen immer schwieriger wird und immer leichter gleichseitige Doppelbilder der fernen Objecte auftreten, weil die Gesichtslinien unwillkürlich mehr u. mehr convergiren. Um ferne, nach unten liegende Gesichtsobjecte zu erhalten, benutzt man zweckmässig einen mehr oder weniger tiefgehaltenen horizontalen oder wenig zur Horizontalebene geneigten Spiegel, welcher ferne über oder an dem Horizonte gelegene Dinge spiegelt. Man befestige den Kopf und den Spiegel, blicke mit dem linken Auge nach dem erheblich unter dem Horizonte in der Nähe der Medianebene erscheinenden Spiegelbilde eines fernen Objects und

markire mit Tinte oder sonstwie den Punkt, wo jetzt die Gesichtslinie den Spiegel durchschneidet. Dann betrachte man denselben Punkt des Spiegelbildes mit dem rechten Auge und markire den Durchschnittspunkt der rechten Gesichtslinie mit der Spiegelebene. Blickt man nun mit beiden Augen zugleich nach dem fernen Spiegelbilde, so wird man es doppelt sehen und die beiden Marken werden sich nicht binocular decken. Gleichwohl kann man jede Marke für sich binocular fixiren: Beweis, dass jede Gesichtslinie sehr wohl auf jeden der beiden Punkte eingestellt werden kann, wenn die andere mit ihr convergirt, nicht aber wenn dieselbe mit ihr parallel ist.

Legt man durch den binocularen Blickraum eine zur primären Blickebene und zur Medianebene senkrechte Ebene, so giebt der Durchschnitt ein binoculares Blickfeld, da je nach der Entfernung, in welcher es von den Augen liegt, eine verschiedene Gestalt hat. In Fig. 36 (S. 445) hat Hering das binoculare Blickfeld seiner beiden in die Ferne sehenden Augen, in demselben Verhältniss verkleinert, in dasjenige Feld eingezeichnet, welches jeder von beiden Gesichtslinien beim einäugigen Sehen zugänglich ist. Man sieht, wie klein hier das binoculare Blickfeld im Vergleich zum gemeinsamen Bewegungsfelde beider Gesichtslinien ist. Die Figur hat aber selbstverständlich nur individuelle Bedeutung.

Auch beim Nahesehen ist, wie Hering gezeigt hat, das binoculare Blickfeld viel kleiner als das Feld, welches den in derselben Entfernung geführten Durchschnitt des Raumes darstellt, der jeder von beiden Gesichtslinien für sich zugänglich ist. Man braucht nur ein kleines Object nahe vor dem Gesichte umherzubewegen und es mit dem Blicke zu verfolgen, so wird man es schon doppelt sehen, wenn es noch erheblich von der Grenze desjenigen Gebietes absteht, welches den Spielräumen beider Gesichtslinien gemeinsam ist, in Lagen also, in welchen jedes einzelne Auge es noch bequem fixiren kann. Bringt man bei gehobener Blickebene ein in der Medianebene gelegenes Object den Augen so nahe, dass die binoculare Fixirung desselben schon Mühe macht und das Gefühl starker Anstrengung im Auge hervorruft, und schliesst dann ein Auge, so wird man bemerken, dass es gar keine Anstrengung kostet, die Gesichtslinie des offenen Auges auf das Object einzustellen, und zwar gleichviel welches Auge das offene ist. Nähert man das Object noch mehr, so zerfällt es in ungleichseitige Doppelbilder, obwohl auch jetzt noch die Gesichtslinie jedes einzelnen Auges auf dasselbe eingestellt werden kann, sobald das andere Auge geschlossen wird.

Aus der Primärstellung kann, wie die oben mitgetheilten An-

gaben lehren, die Gesichtslinie des emmetropischen Auges um beiläufig einen halben rechten Winkel einwärts gewandt werden. Könnten beide Gesichtslinien gleichzeitig so weit einwärts gedreht werden, so müssten sie sich in einem Punkte der primären Blickebene durchschneiden, welcher nur um die halbe Distanz der Augen, d. i. um 30—35 mm. von der Verbindungslinie beider Drehpunkte der Augen entfernt wäre und also ganz dicht vor der Nasenwurzel läge. Die dazu nöthige Convergenz ist jedoch emmetropischen Augen nicht möglich.

Messungen der stärksten möglichen Convergenzgrade sind deshalb schwer anzustellen, weil hierbei die Ermüdung sich fast noch rascher bemerkbar macht, als bei den stärksten Wendungen der Gesichtslinien beim einäugigen Sehen. Ferner ist dabei zu bedenken, dass das Maximum der Convergenz bei verschiedenen Neigungen der Blickebene zum Kopf verschieden ist, bei Hebung derselben ab-, bei Senkung zunimmt.

Den Grund für die Einschränkung des binocularen Blickraumes im Vergleich zu dem Raume, welcher beiden Gesichtslinien beim einäugigen Sehen zugängig ist, findet HERING[1] theils in der Unmöglichkeit, die entsprechenden (ungewohnten) Innervationen aufzubringen, theils in mechanischen Ursachen, welche darin liegen, dass das Auge bei einer und derselben Stellung der Gesichtslinie relativ zum Kopfe beim Nahsehen durch eine etwas andere Muskelthätigkeit in seiner Lage gehalten wird, als wie beim Fernsehen (s. u.).

Wenn man das Excursionsvermögen der Gesichtslinien auf einem in mittler Blick- oder Sehweite (12″) befindlichen, der Frontalebene ungefähr parallelen Gesichtsfelde bestimmt, indem man auf demselben, wie dies SCHNELLER[2] that, kleine Druckschrift aus der primären Lage bis dahin verschiebt, wo eben noch die Buchstaben derselben erkannt werden, so findet man bei Emmetropen, dass das binoculare Blickfeld dem gemeinsamen Theile der beiden unocularen Blickfelder nahezu entspricht. Es ist dies deshalb von vornherein zu erwarten, weil die Innervationen, welche nothwendig sind, um die benutzten Buchstaben direct und scharf zu sehen, beim einäugigen Sehen dieselben sind, wie beim doppeläugigen, sodass also jeder Grund für die relative Einschränkung des binocularen Blickfeldes wegfällt. Aus der Unkenntniss dieses Umstandes erklären sich einige Einwürfe, welche gegen die Angaben HERING's über die relative Grösse des binocularen Blickraumes erhoben worden sind. —

Die Geschwindigkeit der Bewegungen des Blickes hat LAMANSKY[3] unter der Leitung von HELMHOLTZ untersucht. Wenn das Auge wäh-

1 HERING l. c. S. 47.
2 SCHNELLER, Arch. f. Ophthalmologie XXI. (3) S. 133. 1875.
3 LAMANSKY, Arch. f. d. ges. Physiol. II. S. 418. 1869.

rend seiner Bewegung der Reizung durch ein kleines intermittirendes Licht ausgesetzt wird, so wird die Zahl der hierbei gesehenen Nachbilder abhängen von der Zeit, in welcher die einzelnen Lichtreize nacheinander folgen, sowie von der Geschwindigkeit, mit welcher das Auge seinen Weg zurücklegt. Demnach suchte Lamansky aus der Zahl der Nachbilder, welche er erhielt, während er mit dem Auge eine bestimmte Bewegung ausführte und auf dasselbe eine Reihe in bestimmten Zeitintervallen sich folgender Lichtreize einwirken liess, die Winkelgeschwindigkeit der Bewegung der Gesichtslinie zu ermitteln. Als Blickfeld diente ein schwarzer Schirm, über dessen Entfernung Lamansky nichts angegeben hat. Auf demselben bildeten zwei Marken den Anfang und das Ende der Blickbahn. Die Zeit zwischen je zwei Lichtreizen betrug 0,00477″. Der Kopf war fixirt.

Die grösste Winkelgeschwindigkeit, etwa 4 mal 360⁰ in der Secunde, wurde für die Bewegungen in horizontaler Bahn gefunden, sowohl bei aufrechtem als bei vor- oder rückwärts geneigtem Kopfe. Für die verticale Bahn war die Geschwindigkeit nahezu dieselbe. Kleinere Werthe ergaben sich für die schrägen Blickbahnen (etwa 3—3,5 mal 360⁰ in der Secunde).

Die Zeit, welche zu einer Blickbewegung nöthig ist, und welche ausser der eigentlichen Bewegung des Augapfels auch die verschiedenen dabei in Betracht kommenden psychischen Processe in sich schliesst, hat Volkmann [1] in folgender Weise zu bestimmen versucht. Er „fixirte abwechselnd zwei Stecknadeln, welche in verschiedenen Richtungen und Entfernungen vom Auge aufgestellt waren, und prüfte, wie oft er in der Zeit von ½ Minute oder 1800 Tertien den Blick verändern konnte.“ Mittels Division dieser Zeit durch die Zahl der Bewegungen erhielt er die Dauer einer Bewegung in Tertien. Die allgemeinen Ergebnisse seiner Untersuchung waren:

1) „Die Augenbewegungen sind unter allen Umständen sehr viel langsamer als die Fingerbewegungen eines geübten Clavierspielers.

2) Bei gleicher Entfernung der Objecte und unveränderter Stellung der Ebene, in welcher sie liegen, wächst die Schnelligkeit der Augenbewegungen mit der Verkleinerung des zu beschreibenden Winkels, ausgenommen, wenn die Grösse des letzteren unter 7⁰ fällt, wo dann die Beschleunigung der Bewegung aufhört.

3) Die Lage der Ebene, in welcher die gleich weit entfernten Objecte liegen, hat Einfluss auf die Dauer der Bewegung, indem

1 Volkmann, Wagner's Handwörterb. d. Physiol. III. 1. S. 276. 1846.

gleichgrosse Bewegungen am schnellsten in einer lothrechten, langsamer in einer horizontalen oder schiefen Ebene ausgeführt werden.

4) Bewegungen, an welchen beide Augen Theil nehmen, verlangen beträchtlich mehr Zeit, als Bewegungen nur eines Auges (wahrscheinlich, weil die Kreuzung der Sehaxen nicht gleich zu finden ist).

5) Mit zunehmender Grösse der Bewegung wächst die Dauer derselben in schnellerer Progression, wenn beide Augen beim Sehen betheiligt sind, als wenn nur eines benutzt wird.

6) Ungleiche Entfernung der abwechselnd fixirten Objecte hat einen bedeutend retardirenden Einfluss auf die Augenbewegungen."

Die ausführlichen von VOLKMANN mitgetheilten Tabellen gestatten keinen Auszug. Durchschnittlich bedurfte derselbe zu einer Blickbewegung etwa eine halbe Secunde. Die Winkelgrösse der Bewegung war dabei von verhältnissmässig geringem Einfluss, woraus sich schliessen lässt, dass ein grosser Theil der verbrauchten Zeit durch die psychischen Processe in Anspruch genommen wurde, nicht durch die eigentliche Bewegung.

Ueber die Geschwindigkeit, mit welcher durch Veränderungen des Convergenzwinkels der Gesichtslinien der Blickpunkt genähert oder entfernt wird, liegt ferner die Angabe HERING's vor, dass er die Näherung des binocularen Blickpunktes viel rascher ausführen könne als dessen Fernerung.

Mit der Näherung oder Fernerung des Blickpunktes associirt sich, wie im Cap. XI näher zu erörtern ist, die Accommodation für die Nähe oder Ferne und die Verengerung oder Erweiterung der Pupille. Ueber die Geschwindigkeit dieser Binnenbewegungen des Auges sind von VOLKMANN, VIERORDT und DONDERS Untersuchungen angestellt worden.

VOLKMANN [1] fixirte mit einem Auge durch zwei Kartenlöcher von 2 mm. Distanz abwechselnd zwei Stecknadeln, deren eine 6, die andere 11 Zoll vom Auge entfernt war, und konnte so in Zeit von einer halben Minute 20 Accommodationsbewegungen ausführen, wobei ihm das Verschwinden der Diplopie als Kriterium der genauen Accommodation diente.

VIERORDT [2] maass mit Hülfe eines HIPP'schen Chronoskops die Zeit, welche verging, wenn er von der einäugigen Betrachtung eines scharf gesehenen 18 Meter entfernten Objectes zur Betrachtung eines näheren in derselben Richtung gelegenen weissen Fadens (oder um-

1 VOLKMANN l. c. S. 309.
2 VIERORDT, Grundriss der Physiologie S. 425. 1877.

gekehrt) überging und das völlige Verschwinden der anfangs auftretenden Zerstreuungskreise abwartete.

Abstand des nahen Objectes vom Auge in Ctm.	Zeiten in Secunden für die Accommodation.	
	Fern auf Nah.	Nah auf Fern.
10	1,18	0,84
11	0,94	0,66
12	0,83	0,57
14	0,77	0,52
16	0,64	0,46
22	0,60	0,44
28	0,49	0,39
34	0,43	0,37
40	0,30	0,29
52	0,24	0,22
64	0,20	0,15

Die Accommodation von Nah auf Fern geschah mithin viel schneller als die von Fern auf Nah.

Betreffs der, die Accommodationsänderungen begleitenden Pupillenänderungen fand Donders[1], dass die ersteren den letzteren etwas vorausgehen, und dass er durch abwechselndes Accommodiren für Nah und Fern bis dreissigmal in der Minute die Pupille „zu starker Contraction und Dilatation bringen konnte.“ —

Bei seinen Untersuchungen über die Geschwindigkeit der Blickbewegung erhielt Lamansky auch Aufschlüsse über die Form der Bahn, welche die Gesichtslinie auf dem ebenen Gesichtsfelde zurücklegte. Es erforderte, selbst wenn die Marken in einer Horizontale lagen, einige Uebung, „um die Nachbilder in eine gerade Linie zu bekommen“, vielmehr bildeten sie anfangs „kleine Bogen“. Bei den schrägen Bewegungen „bildeten die Nachbilder krumme Linien, welche für alle schrägen Bewegungen nach innen concav nach innen, für alle schrägen Bewegungen nach aussen concav nach aussen“ waren. Hieraus schliesst Lamansky, dass die Gesichtslinie bei der Ueberführung von einem Punkte zum andern keine Ebene durchlief und dass die Bahnen, welche die Gesichtslinie auf der Tafel beschrieb, eine der Krümmung der Nachbildreihe entgegengesetzte Krümmung hatten. Dieser Schluss ist jedoch nur für den Fall bindend, dass der Anfangs- und Endpunkt der Bewegung in einer durch die Primärstellung der Gesichtslinie gehenden Ebene lagen (s. u.). Denn wenn die Gesichtslinie bei Lamansky's Versuchen zwar eine

1 Donders, Die Anomalien der Refract. u. Accommod. § 43. 1866.

ebene Bahn durchmass, das Auge aber zugleich eine Rollung um die Gesichtslinie erfuhr, so musste die Nachbildreihe auch krummlinig werden. Angenommen aber, dass die Krümmungen der Nachbildreihe im Wesentlichen auf der Krümmung der Bahn der Gesichtslinie beruhten, bestätigen die Versuche LAMANSKY's die Ergebnisse, welche schon früher WUNDT [1] nach einer andern Methode erhalten hat. Derselbe fand, dass die Gesichtslinie beim Blicken nach oben und unten, rechts und links auf einer der Frontalebene parallelen Verticalebene geradlinige Bahnen, bei allen schrägen Bewegungen aber krummlinige Bahnen beschrieb. Dieselben waren beim Blicken

schräg nach innen und oben:	convex nach innen und unten
„ „ „ „ unten:	„ „ „ „ oben
„ „ aussen „ oben:	„ „ aussen „ unten
„ „ „ „ unten:	„ „ „ „ oben.

Dabei war die Krümmung am stärksten, wenn bei aufrechtem Kopfe die Blickbahn um 45° zum Horizont geneigt war.

Gleichgiltig war dabei, ob die Gesichtslinie aus der (ungefähren) Primärstellung oder aus einer beliebigen anderen Stellung ihre Bewegung begann.

WUNDT's Methode ist folgende: Ein Bogen Papier wird in quadratische Felder getheilt und jedes derselben mit einer Zahl, einem Buchstaben oder einem anderen Merkpunkte versehen. Die Merkpunkte müssen so gewählt werden, dass sie bei raschem Ueberfliegen leicht erkannt und nachher leicht wieder aufgefunden werden können. Man fixirt nun zunächst bei geradeaus gerichtetem Blicke einen dieser Punkte, während man das Papier in eine auf der Gesichtslinie senkrechte Ebene und in bestimmten Abstand vom Auge hält; zugleich merkt man sich einen anderen Punkt, den man eben noch im indirecten Sehen beobachten kann, und auf den man die Sehaxe überzuführen gedenkt; es ist gut diesen Punkt noch mit einem besonderen Zeichen zu versehen, damit man ihn nicht etwa verliere. Geht man nun vom ersten Fixationspunkt in continuirlicher Bewegung zum zweiten über, so ist es nach einiger Uebung leicht möglich, wenigstens e i n e n zwischenliegenden Punkt, der mit der Gesichtslinie überfahren wird, wahrzunehmen; macht man daher denselben Weg in derselben Richtung mehrmals nach einander, so kann man leicht mehrere derartige Punkte auffinden, und durch Verbindung derselben erhält man die Curve, welche die bis zur Fläche

1 WUNDT, Ztschr. f. rat. Med. 3. Reihe. VII. S. 355. 1859 und Beiträge zur Theorie der Sinneswahrn. S. 202. Leipzig 1862.

des Gesichtsfeldes verlängert gedachte Gesichtslinie in diesem beschreibt.

Ob der Kopf fixirt war oder nicht, hat Wundt nicht angegeben.

ZEHNTES CAPITEL.

Die Bewegungen des Augapfels.

I. Vom Drehpunkte des Auges.

Da die hintere Fläche des normalen Augapfels einer Kugelfläche nahe kommt, und die mit Fettgewebe ausgekleidete Orbitalhöhle nothwendig dieselbe Form hat, so liegt es nahe, den Augapfel mit einem Kugelgelenk zu vergleichen und den Krümmungsmittelpunkt der Hinterfläche des Bulbus zugleich als den sowohl im Augapfel wie in der Orbita festliegenden Drehpunkt anzusehen. Indessen ist erstens das Fettpolster der Orbita viel zu nachgiebig, als dass eine Drehung um einen excentrischen Punkt des als sphärisch gedachten Bulbus oder eine Verschiebung des ganzen Bulbus bei seinen Drehungen ausgeschlossen werden könnte. Zweitens sind die Abweichungen des Bulbus von der Kugelgestalt die Regel und bei vielen ametropischen Augen so erheblich, dass die auf den ersten Blick ansprechende Annahme eines festen Drehpunktes alle Wahrscheinlichkeit verliert. Hat der Augapfel die Form eines Ellipsoides, so sind kleine Verschiebungen des ganzen Bulbus während seiner Drehungen von vornherein höchst wahrscheinlich, weil jede Drehung des Augapfels zugleich eine Veränderung der Form seiner Höhle bedingt und kein Grund zu der Annahme vorliegt, dass die Widerstände, welche dieser Formveränderung entgegenstehen, gerade so angeordnet seien, dass daraus eine Fixirung des Drehpunktes resultiren müsste.

Es fragt sich also, ob alle Axen, um welche sich der Augapfel drehen kann, seien sie feste oder augenblickliche, sich in einem und demselben Punkte des Augapfels schneiden, und ob dieser Punkt zugleich eine unveränderliche Lage in der Orbita hat oder nicht. Es könnte ersteres der Fall sein, ohne dass zugleich das letztere statthat, d. h. es könnte einen im Augapfel unveränderlichen Drehpunkt geben, aber der ganze Augapfel könnte sich während der Drehung sammt seinem Drehpunkte in der Orbita verschieben. Diesenfalls

würde also der im Augapfel feste Drehpunkt im Raume d. i. hier in der Orbita wandern. Oder es könnte umgekehrt der Drehpunkt des Augapfels eine feste Lage in der Orbita haben, aber der Augapfel könnte sich während seiner Drehung relativ zu diesem festen Punkte der Orbita verschieben: dann würde der Drehpunkt zwar in der Orbita festliegen, aber im Auge wandern. Bei den im Auge gegebenen Verhältnissen ist es jedoch vornherein das bei Weitem Wahrscheinlichste, dass es weder im Augapfel noch in der Orbita einen eigentlichen Drehpunkt giebt. Freilich lässt sich auch anderseits vorhersagen, dass die Annahme eines in beiden Beziehungen festen Drehpunktes wenigstens für das annähernd kugelig gebaute Auge gewiss nicht weit von der Wahrheit entfernt ist.

Wenn es weder im Auge noch in der Orbita einen festen Drehpunkt giebt, so heisst dies soviel, als dass sich nicht sämmtliche überhaupt mögliche Drehungsaxen des Auges in einem Punkte des Bulbus oder der Orbita schneiden. Denken wir uns zwischen zwei beliebig im Bulbus gelegene, sich nicht schneidende Drehungsaxen desselben die kürzeste Linie gelegt, welche überhaupt von einem Punkte der einen zu einem Punkte der andern gezogen werden kann, so steht diese Linie auf beiden Axen senkrecht. Eine solche Linie heisse eine interaxiale. Verbinden wir jede einzelne mögliche Drehungsaxe des Bulbus mit jeder anderen möglichen Axe, so erhalten wir eine unendliche Anzahl solcher interaxialer Linien. Wenn nun, wie dies im Auge aller Wahrscheinlichkeit nach der Fall ist, alle diese interaxialen Linien des Bulbus nur einen sehr kleinen Raum in demselben einnehmen, welcher der interaxiale Raum des Bulbus heissen möge, so können wir sagen, das Auge drehe sich annähernd um einen im Auge festen Drehpunkt. Analog können wir auch für alle möglichen durch die Orbitalhöhle gelegten Drehungsaxen den interaxialen Raum der Orbita suchen; auch dieser würde aller Wahrscheinlichkeit nach sehr klein sein, so dass wir auch sagen können, das Auge drehe sich um einen annähernd festen Punkt der Orbitalhöhle.

Verschiebungen des ganzen Augapfels sind zuerst von J. J. Müller[1] mit Hilfe eines weiter unten zu beschreibenden Spiegelapparates beobachtet worden. Er fand, „dass mit dem Bestreben, die Lidspalte möglichst weit zu öffnen, der Bulbus aus der Orbita hervortritt". Dieses Hervortreten erfolgt sehr rasch und verschwindet ebenso beim Nachlass der energischen Contraction des levator palp.

1 J. J. Müller, Arch. f. Ophthalmologie XIV. (3) S. 205. 1868.

super. Bei Primärstellung konnte es bis reichlich 1 mm. gesteigert werden. Bei median- oder lateralwärts gewandter Gesichtslinie war das Vortreten merklich kleiner; ebenso nahm es mit der Hebung der Blickebene ab und verschwand bei der stärksten Hebung gänzlich. Bei gesenkter Blickebene nahm es eher zu als ab. Das Vortreten zeigte sich auch dann, wenn die Oeffnung der Lidspalte trotz der stärkeren Innervation nicht grösser wurde, blieb aber aus, wenn das obere Lid künstlich gehoben resp. in die Orbita hineingeschoben wurde.

Donders[1] bestätigte die Angaben Müller's, indem er die Lage des Cornealprofils mittels des Ophthalmometers controlirte. Er fand, dass der Augapfel nicht nur bei stärkerer Oeffnung der Lidspalte hervortritt, sondern auch bei Verengerung der Lidspalte etwas zurückweicht. Letzteres war auch beim Nicken der Fall.

Es betrug bei vier verschiedenen Personen

das Vortreten des Bulbus:	0,86;	0,37;	0,80;	0,80 mm.
das Zurücktreten desselben:	0,41;	0,41;	0,66;	0,59 mm.
die ganze Lageänderung:	1,27;	0,78;	1,46;	1,39 mm.

Berlin[2] fand nach einer anderen, unten zu erörternden Methode, wenn er, von der gewohnheitsmässigen Oeffnung der Lidspalte ausgehend, diese Oeffnung möglichst steigerte, für sein linkes Auge ein Vortreten um 0,677 mm., für das rechte um 0,652 mm. Ueberdies beobachtete er, wenn er bei Primärstellung eine Nadelspitze auf den Zerstreuungskreis eines ferneren Punktes visirte, bei weiterer Oeffnung der Lidspalte eine Verschiebung der Nadelspitze nach oben in Bezug auf den Zerstreuungskreis, woraus er schliesst, dass das Auge sich dabei etwas nach unten verschob. Nach seinen Messungen betrug die Verschiebung für das linke Auge 0,567 mm., für das rechte 0,689 mm. Diese Verschiebung nahm ab bei Seitwärtswendung des Blickes nach beiden Richtungen, ebenso beim Blick nach oben. Beim Blicken nach unten nahm sie bis zu 17° Neigung der Blickebene zu, um weiterhin wieder abzunehmen. Bei erhobenem Blicke trat bei leichtem Schlusse des Lides eine geringe Verschiebung des Bulbus nach oben ein, welche sich in geringerem Grade auch bei horizontaler und gesenkter Blickrichtung zeigte, bei 20° Senkung jedoch ganz verschwand. Endlich fand Berlin nach derselben Methode eine sehr kleine seitliche Verschiebung des Bulbus nach innen im Betrage von 0,15—0,175 mm., wenn er bei Primärstellung die Lidspalte stark erweiterte; dieselbe nahm bei nasenwärts ge-

1 Donders, Arch. f. Ophthalmologie XVII. (1) S. 99. 1871.
2 Berlin, ebenda XVII. (2) S. 181. 1871.

richteter Gesichtslinie ab und wurde bei 14—22° Einwärtswendung gleich Null, um darüber hinaus in entgegengesetzter Richtung aufzutreten. Bei Richtung des Blickes um 30—38° nach aussen betrug die Verschiebung 0,175 bis 0,25 mm. im selben Sinne wie bei der Primärstellung.

Diese Beobachtungen veranlassten BERLIN zu untersuchen, ob sich auch bei den in gewohnter Weise ausgeführten Blickbewegungen Verschiebungen des ganzen Bulbus nachweisen lassen, wobei er auf einen 10—15 dm. entfernten, horizontalen und der Frontalebene parallelen Faden visirte, hinter welchem die Zerstreuungskreise dreier sehr kleiner, 10—15 Fuss entfernter Spiegel erschienen, deren Mittelpunkte mit dem Faden in einer Ebene lagen. Der mittlere Spiegel entsprach ungefähr der Primärstellung. Für das in dieser Stellung nach dem mittleren Spiegel visirende Auge halbirte der Faden den Zerstreuungskreis des Spiegels. Bewegte sich nun der Blick den Faden entlang nach rechts oder links, so traf er bei einer Wendung von 25°—30° wieder auf den Zerstreuungskreis eines Spiegelchens, und wenn die Hauptvisirlinie bei dieser Bewegung nicht aus der Ebene des Fadens und der Spiegelcentren verschoben worden war, musste wieder der Faden den Zerstreuungskreis des Spiegels halbiren. Dies war jedoch meistens nicht der Fall. Durch verschiedene Drehungen und Neigungen des Kopfes konnten dann die Bewegungen des Blickes in verschiedenen Richtungen und bei verschiedenen seitlichen, hohen oder tiefen Lagen der Blickbahn untersucht werden. Die Fig. 37 zeigt die Abweichung des Zerstreuungskreises vom Faden für das linke Auge, wie sie dem Beobachter erschien. Für das rechte Auge würde das Spiegelbild dieser Figur gelten. Die Richtung und Lage der Linien entspricht der Richtung und Lage des Fadens in Bezug auf den immer aufrecht gedachten Kopf, wenn das auf den Punkt *p* gerichtete Auge in der Primärstellung ist. *A* bedeutet Aussen, *I* Innen. Die Punkte bedeuten die Zerstreuungskreise der kleinen Spiegel. In derselben Richtung wie der Zerstreuungskreis relativ zum Faden verschoben erschien, musste auch eine Componente der Verschiebung des Centrums der Visirlinien erfolgt sein. Die Grösse der Verschiebungen der Zerstreuungskreise relativ zum Bilde

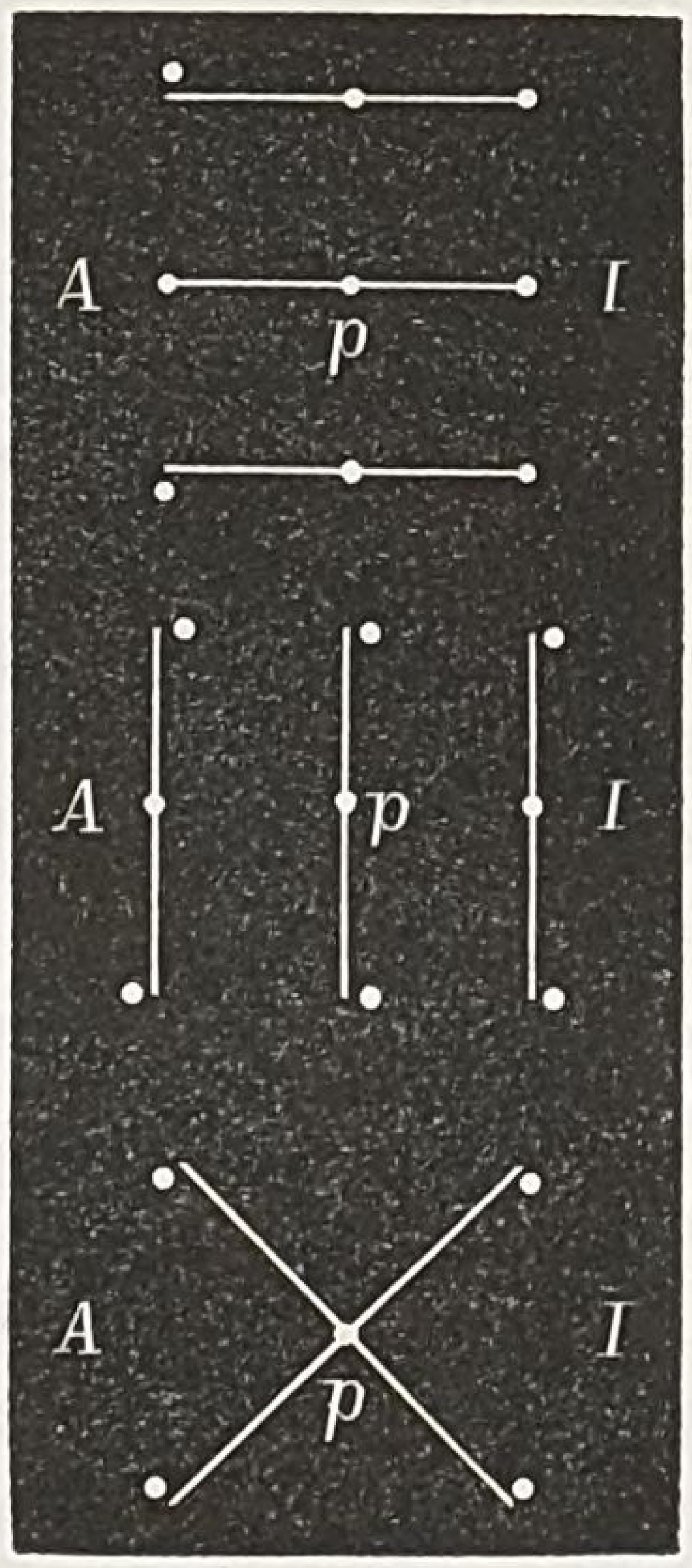


Fig. 37.

des Fadens hat BERLIN nicht gemessen. Er ist der Ansicht, dass dieselben aus Verschiebungen des ganzen Bulbus zu erklären seien, und schätzt die letztere auf beiläufig 0,5 mm.

Es muss bemerkt werden, dass wenn während der Bewegung des Blickpunktes entlang dem Faden die festen oder die augenblicklichen Axen der Drehung nicht durch die Hauptvisirlinie selbst gehen, nothwendig kleine Verschiebungen der Zerstreuungskreise in Bezug auf den Faden eintreten müssen, auch wenn es einen festen Drehpunkt giebt. Was BERLIN lediglich als Folge einer Verschiebung des Bulbus nahm, ist zunächst und für sich nur ein Beweis für ein Heraustreten des Centrums der Visirlinie aus der Ebene, in welcher der Faden und die Spiegelcentren liegen, womit nicht bestritten werden soll, dass eine Verschiebung des Bulbus die wesentliche Ursache ist.

Nachweis eines Drehpunktes überhaupt. Während man früher sich mit der Annahme begnügte, dass es einen unveränderlichen Drehpunkt des Auges gebe, und sich lediglich damit beschäftigte, den Ort dieses hypothetischen Punktes im Auge zu bestimmen, hat zuerst J. J. MÜLLER experimentell zu entscheiden gesucht, ob überhaupt ein Drehpunkt existirt. Nachher haben VOLKMANN, WOINOW und BERLIN dieselbe Frage behandelt. Die Methoden VOLKMANN's und WOINOW's sind im Wesentlichen gleich und zwar die einfachsten, aber minder genau als die Methoden von MÜLLER und BERLIN.

VOLKMANN [1] zog auf einer ebenen Tafel aus einem Punkte derselben eine Anzahl gerader Linien radienartig derart, dass je zwei benachbarte einen Winkel von 10° einschlossen. Auf jeder dieser Linien wurden zwei feine Nähnadeln senkrecht zur Tafel eingesteckt, die eine 8″, die andere 16″ vom Ausgangspunkte der Linien entfernt. An die Stelle dieses Ausgangspunktes der Linien wurde, nachdem das entsprechende Stück des Brettes abgesägt worden war, das Auge des Beobachters gebracht, dessen Kopf fest fixirt war. Es zeigte sich, dass für 10 Beobachter sowohl eine horizontale als eine verticale Stellung der Tafel relativ zum Auge gefunden werden konnte, bei welcher jede zwei, derselben Geraden angehörige Nadeln sich für den Beobachter „deckten“, wenn er auf dieselben visirte. VOLKMANN schloss hieraus, dass sowohl die Drehung in der horizontalen als in der verticalen Ebene um einen im Auge und im Raume festen Punkt des Augapfels erfolge. Indessen könnte der Versuch, auch wenn man von den relativ grossen Fehlerquellen desselben absehen wollte, streng genommen nur beweisen, dass die Hauptvisirlinie sich

1 VOLKMANN, Ber. d. sächs. Ges. d. Wiss. Math.-phys. Cl. 6. Febr. 1869.

sowohl in horizontaler als in verticaler Richtung um einen relativ zur Orbita festen Punkt drehte, welcher auf der Hauptvisirlinie selbst lag. Im Augapfel konnte dabei der Drehpunkt seine Lage stetig ändern. Denn eine Gerade kann sich um einen im Raume festen Punkt drehen und doch während dieser Drehung im Drehpunkte vorwärts oder rückwärts gleiten.

Es seien die Geraden $d\gamma$, dg und $d\gamma'$ in der Fig. 38 drei Lagen der Hauptvisirlinie, und k, c, k' die zugehörigen Lagen des auf der Hauptvisirlinie gedachten geometrischen Mittelpunktes des Augapfels, so zeigt die Figur, dass während die Hauptvisirlinie sich aus der Lage $d\gamma$ in die Lage $d\gamma'$ um den im Raume festen Punkt d dreht, sie doch durch diesen Punkt erst vorwärts dann wieder rückwärts gleitet und der mit ihr verbundene Augapfel sich erst nach vorn und dann wieder nach hinten verschiebt.

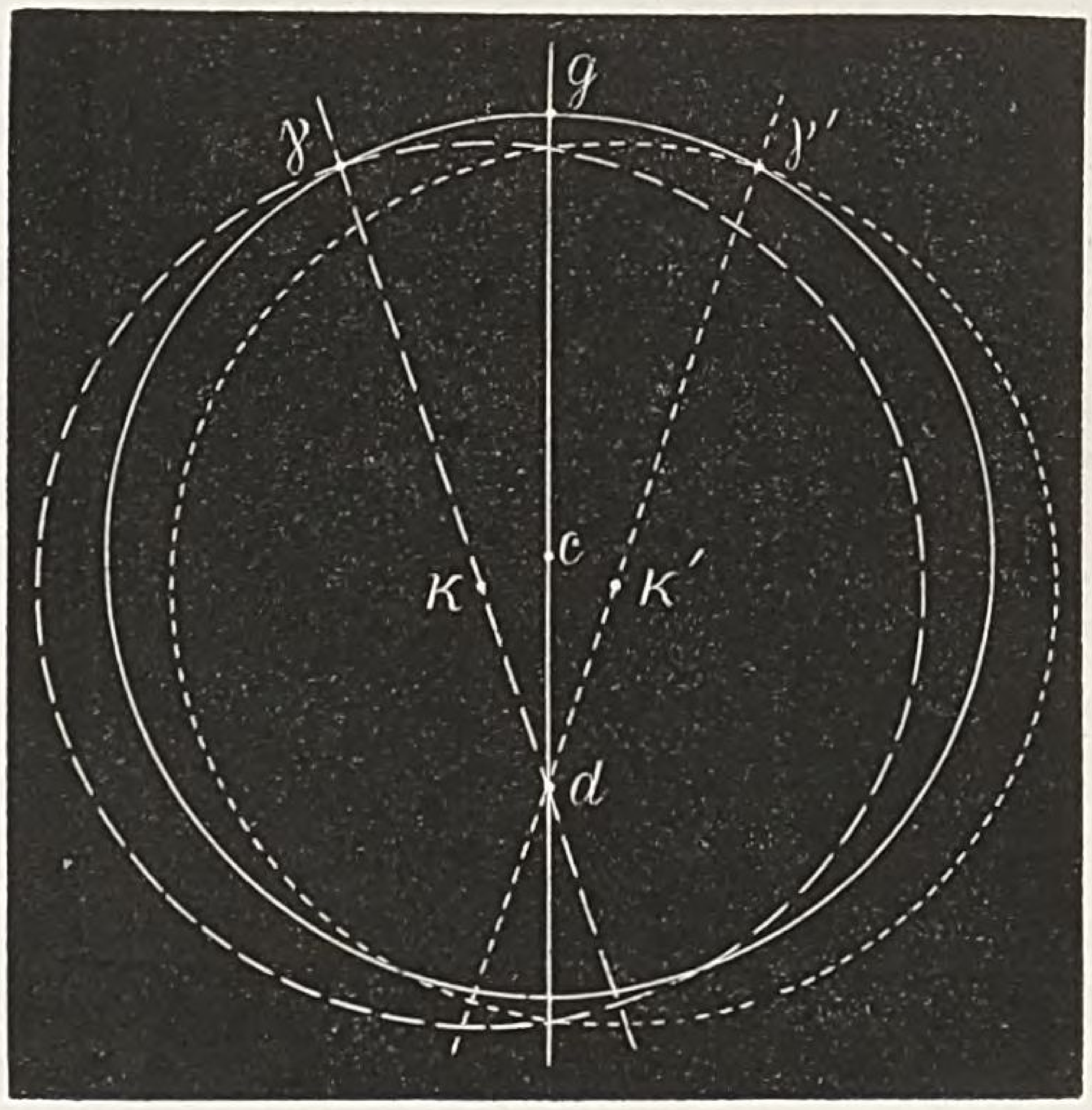


Fig. 38.

Wenn übrigens bei dem beschriebenen Versuche Volkmann's sich nicht alle Nadelpaare gedeckt hätten, so hätte dies, wie Berlin [1] hervorhob, nichts gegen die Existenz eines festen Drehpunkts bewiesen; denn wenn derselbe nicht auf der Hauptvisirlinie liegt, können sich auch nicht alle Lagen der letzteren in einem Punkte schneiden, sondern müssen nur sämmtlich eine Kugel tangiren, die den festen Drehpunkt zum Centrum und den Abstand desselben von der Hauptvisirlinie zum Radius hat, wie Fig. 39 zeigt, in welcher f den Drehpunkt, $g\,g$, $\gamma\,\gamma$, $\gamma'\,\gamma'$ die Hauptvisirlinie bedeuten.

Ebensowenig streng wie die Versuche Volkmann's beweisen die ähnlichen Versuche Woinow's [2] die Existenz eines zugleich im Augapfel und in der Orbita festliegenden Drehpunktes. Woinow untersuchte seine Augen nach einer von Helmholtz angegebenen Methode. „Auf einer horizontalen Tischplatte wurde ein Blatt Papier aufgespannt und am Rande des Tisches eine Vorrichtung für ein Zahnbrettchen angebracht und sodann ein Lineal von 20 mm. Breite und 640 mm. Länge dem Auge gegenüber in gewisser Entfernung einge-

1 Berlin, Arch. f. Ophthalmologie XVII. (2) S. 157. 1871.
2 Woinow, ebenda XVI. (1) S. 247. 1870.

stellt. Auf dem Lineal waren feine parallele Striche mit Zwischenräumen von 20 mm. vertical zur Fläche des Tisches gezogen. Hierauf schloss er das eine Auge und nahm ein anderes ähnliches Lineal von 10 mm. Breite und 400 mm. Länge mit ähnlichen Strichen von nur 10 mm. Zwischenräumen zur Hand und bemühte sich, es vor sich so auf den Tisch zu stellen, dass alle Striche desselben bei allen Blickrichtungen in der gegebenen Ebene mit den entsprechenden Strichen des andern entfernteren Lineals zusammenfielen“. Bei horizontalen Blickbewegungen fand ein vollkommenes Zusammenfallen der entsprechenden Striche beim strengsten Parallelismus der beiden Lineale statt. Um zu untersuchen, wie sich die Bewegungen des Blickes auf anderen Ebenen verhalten, drehte er das Zahnbrettchen und folglich auch den Kopf nach verschiedenen Richtungen, ohne jedoch die Stellung der Tischebene zu ändern. Hierauf bemühte er sich abermals, das Lineal in der vorher erwähnten Weise aufzustellen. Bei allen diesen Versuchen, sowie auch bei denjenigen, wo die Bahnebene der Gesichtslinie unter verschiedenen Höhen- und Seitenwendungswinkeln stand, beobachtete er, dass das Zusammenfallen der entsprechenden Striche der Lineale nur bei vollkommenem Parallelismus derselben stattfand. Hieraus schloss Woinow, „dass es für jede einzelne Ebene der Blickbewegung einen festen Drehpunkt gebe“. Um nun zu beweisen, dass dieser Drehpunkt für alle Ebenen der Blickbewegung derselbe sei, spannte er auf eine verticale Wand ein grosses Blatt Papier, auf dem parallele, verticale und horizontale Linien mit Zwischenräumen von 40 mm. in der Weise gezogen waren, dass das ganze den Linien eines Schachbrettes ähnlich war. Sodann stellte er sich vor die Wand und bemühte sich, bei fester Fixation des Kopfes und bei Schluss des einen Auges einen Rahmen mit aufgespannten horizontalen und verticalen Fäden von 20 mm. Zwischenraum so einzustellen, dass alle Fäden mit den

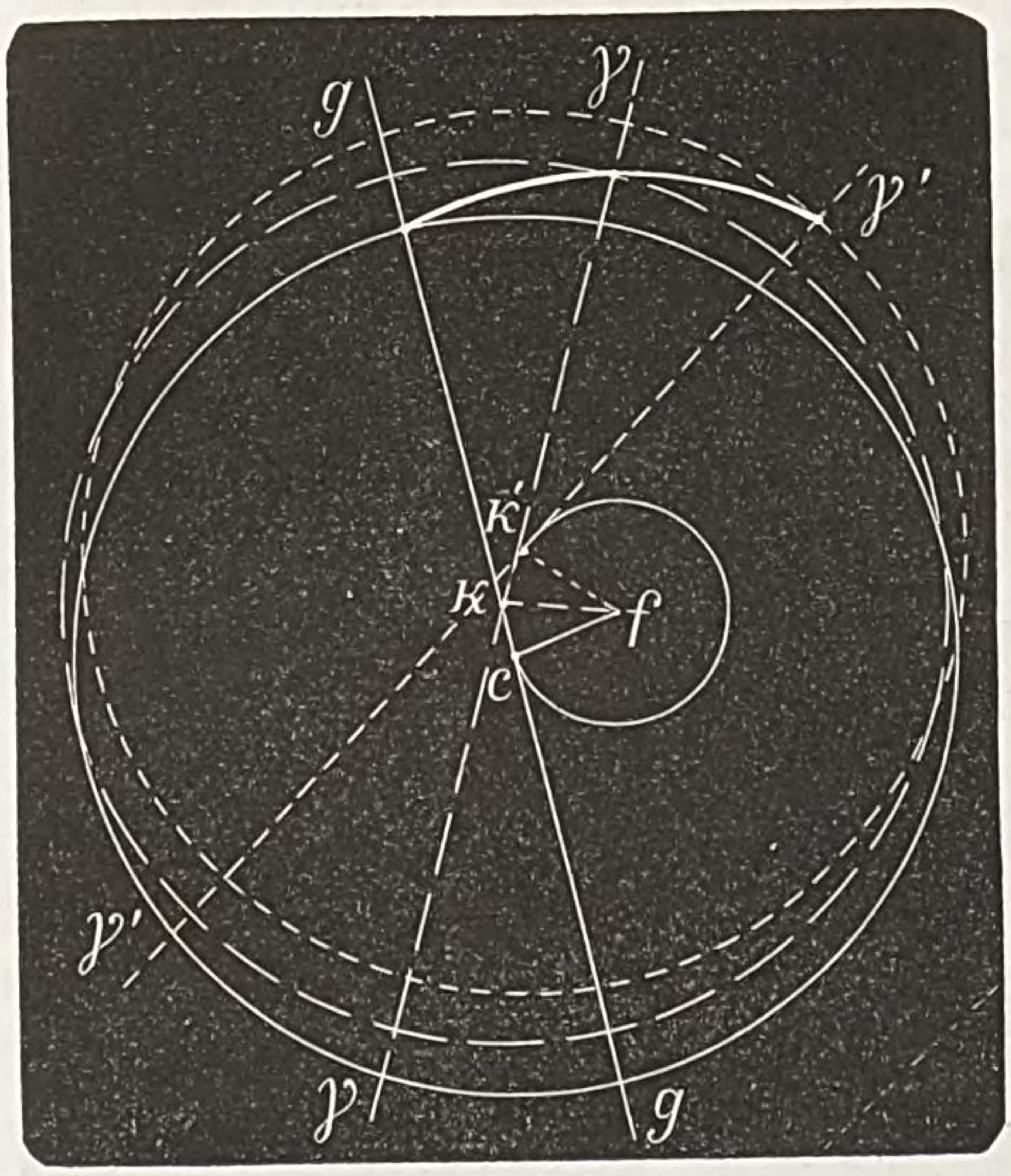


Fig. 39.

entsprechenden Linien des Papiers bei allen Blickrichtungen zusammenfielen, was denn auch möglich war.

Die Weite der Fehlergrenzen sind weder für Volkmann's noch für Woinow's Methode bestimmt worden. Wir könnten aus ihren Versuchen, soweit die Fehlergrenzen das gestatten, nur den Schluss ziehen, dass der Augapfel sich um einen in der Orbita festliegenden Punkt dreht, und dass die Hauptvisirlinie bei allen Stellungen des Auges durch diesen Punkt geht. Inwieweit dieser Drehpunkt auch im Auge festliegt, ist aus den Versuchen nicht ersichtlich.

J. J. Müller[1] benutzte eine von Fick angegebene Methode. Er meinte „am unmittelbarsten führe zum Entscheide, ob es einen Drehpunkt gibt, die Ermittelung der Bahn, welche irgend ein bestimmter Punkt der Cornea während der Bewegung des Bulbus durchläuft."[2] „Die Form der Bahn entscheide ganz unmittelbar die Frage, ob die Drehung des Hornhautpunktes um einen festen Punkt herum stattgefunden hat oder nicht. Im vorliegenden Falle erzeuge eine solche und nur eine solche Bewegung eine kreisförmige Bahn des Punktes."[3] Müller's Methode gestattete nun, den jeweiligen Ort des Durchschnittspunktes der Hauptvisirlinie und der vorderen Cornealfläche auf eine der horizontalen Bahnebene jener Linie parallele Ebene zu projiciren und so eine aus einer Reihe einzelner Punkte bestehende Projection der Bahn jenes Cornealpunktes zu gewinnen, welche Projection der Form der wirklichen Bahn congruent war. Für diese experimentell gewonnene Punktreihe suchte er „probeweise den Punkt der Zeichnungsebene und den Radius auf, welche einen Kreisbogen lieferten, in den die Punkte entweder fielen oder zu dessen Seiten sie sich möglichst gleichmässig vertheilten." Diesen Punkt nahm er für die Projection des Drehpunktes.

Nun ist es zwar richtig, dass wenn das Auge sich um einen im Raume und im Augapfel festen Punkt dreht, jeder beliebige Punkt des Augapfels dabei einen Kreisbogen beschreiben muss; aber man darf nicht, wie dies Müller that, diesen Satz umkehren. Denn ein bestimmter Punkt des Augapfels, z. B. der Durchschnittspunkt der Hauptvisirlinie und der vorderen Cornealfläche kann sehr wohl einen Kreisbogen beschreiben, während der Drehpunkt im Auge wandert. Fig. 38 liefert hierfür ein Beispiel. Ist $\gamma g \gamma'$ die kreisförmige Bahn des genannten Cornealpunktes, so zeigt die Figur, dass der im Raum festliegende Drehpunkt d seine Lage im Augapfel während der Be-

1 J. J. Müller, Arch. f. Ophthalmologie XIV. (3) S. 183. 1868.
2 l. c. S. 191.
3 l. c. S. 204.

wegung fortwährend ändert, d. h. dass der Augapfel sich relativ zu diesem Drehpunkt stetig verschiebt, was soviel bedeutet, als dass der Drehpunkt im Auge wandert. Es ist aber auch der noch verwickeltere Fall möglich, dass, während der Cornealpunkt einen Kreisbogen beschreibt, weder ein im Auge noch ein im Raume fester Drehpunkt existirt.

Durch den theoretischen Irrthum MÜLLER's wird übrigens der Werth seiner Beobachtungen nicht beeinträchtigt, weil durch seine Methode zugleich die jeweilige Lage der Hauptvisirlinie gegeben wird.[1] Die Projectionen dieser Linie auf die der Bahnebene parallele Ebene durchschnitten sich, wie er angibt, entweder fast alle in einem Punkte oder „schlossen sich einem kleinen Kreise um denjenigen Punkt herum an“[2], welcher zugleich der Krümmungsmittelpunkt des vom Cornealpunkte beschriebenen Kreisbogens war. Wenn aber eine im Augapfel feste Gerade (die Hauptvisirlinie) bei den Bewegungen des Auges eine Ebene beschreibt und dabei in allen Lagen einen im Raume festliegenden Kreis tangirt oder durch einen im Raum festen Punkt geht, und zugleich ein bestimmter Punkt der Geraden (der Cornealpunkt der Hauptvisirlinie) einen Kreisbogen beschreibt, der mit jenem Kreise concentrisch ist oder jenen Punkt zum Krümmungsmittelpunkt hat, so ist der Krümmungsmittelpunkt des Kreisbogens der zugleich im Raume und im Augapfel feste Drehpunkt für die bezügliche Bahnebene der Geraden.

MÜLLER untersuchte bei horizontaler Bahnebene der Hauptvisirlinie und verschiedenen Neigungen des Kopfes zu dieser Horizontalebene. Wir dürfen aus seinen Beobachtungen schliessen, dass sich sein Auge bei diesen Bewegungen wirklich um einen sowohl im Raume als im Augapfel annähernd festen Punkt drehte. Aber dieser Punkt hatte, wie MÜLLER fand, nicht für alle Neigungen der Bahnebene zum Kopfe dieselbe Lage im Augapfel.

Die Projectionen der Hauptvisirlinie und ihres Durchschnittspunktes mit der vorderen Cornealfläche auf eine, der Bahnebene jener Linie parallele Ebene gewann MÜLLER auf folgende Weise: Zwei verticale, unter 45^0 Neigung zu einander fest verbundene Spiegel (*I* und *II*, Fig. 40) werden je mit einer verticalen Linie versehen (deren Durchschnitte P' und P'' darstellt), und so vor dem eignen Auge ($A A'$) angebracht, dass der eine Spiegel (*I*) auf der lateralen Seite der Hauptvisirlinie, der andere (*II*) schräg vor dem Auge steht. Unter diesen Umständen kann das Auge

1 Ganz streng genommen ist allerdings auch dies nicht der Fall, weil die Projection der Hauptvisirlinie auf die Horizontalebene keinen Aufschluss über etwaige Verschiebungen dieser Linie in verticaler Richtung giebt.

2 l. c. S. 209.

sein Bild ($B\,B'$) im Profil sehen. Werden dann weiter die Spiegel so eingestellt, dass die Linie (P'') des schräg vor dem Auge stehenden Spiegels (II) und das von letzterem entworfene Bild (b) der Linie (P') des andern Spiegels sich für das beobachtende Auge decken, und dieses Deckbild an den cornealen Rand des ocularen Bildes ($B\,B'$) tangirt, so ist der Ort bekannt, wo der Durchschnittspunkt (A) der Hauptvisirlinie mit der Cornea liegt. Die Linie $A'B$ ist bekannt, weil der Punkt P'' gegeben und der Punkt b, in welchem das Spiegelbild des Punktes P' liegt, aus der gegebenen Lage des letzteren zu finden ist. Eine kurze geometrische Betrachtung ergiebt ferner, dass ein von P' auf die Linie $A'AB$ gefälltes Loth letztere Linie im Punkte A, d. i. der gesuchte Punkt, treffen muss. Stehen die verticalen Spiegel auf einem horizontalen Planum, so lassen sich die zur Construction des Punktes A nöthigen Punkte und Linien auf dem Planum so wie in Fig. 40 markiren, um so den senkrecht unter dem Cornealpunkte A liegenden Punkt des Planums finden. Giebt man bei fixirtem Kopfe der Hauptvisirlinie verschiedene Stellungen innerhalb der Horizontalebene, und bestimmt für jede Stellung die Lage jenes Punktes, so erhält man eine Punktreihe, welche die Projection der Bahn des Cornealpunktes A darstellt.

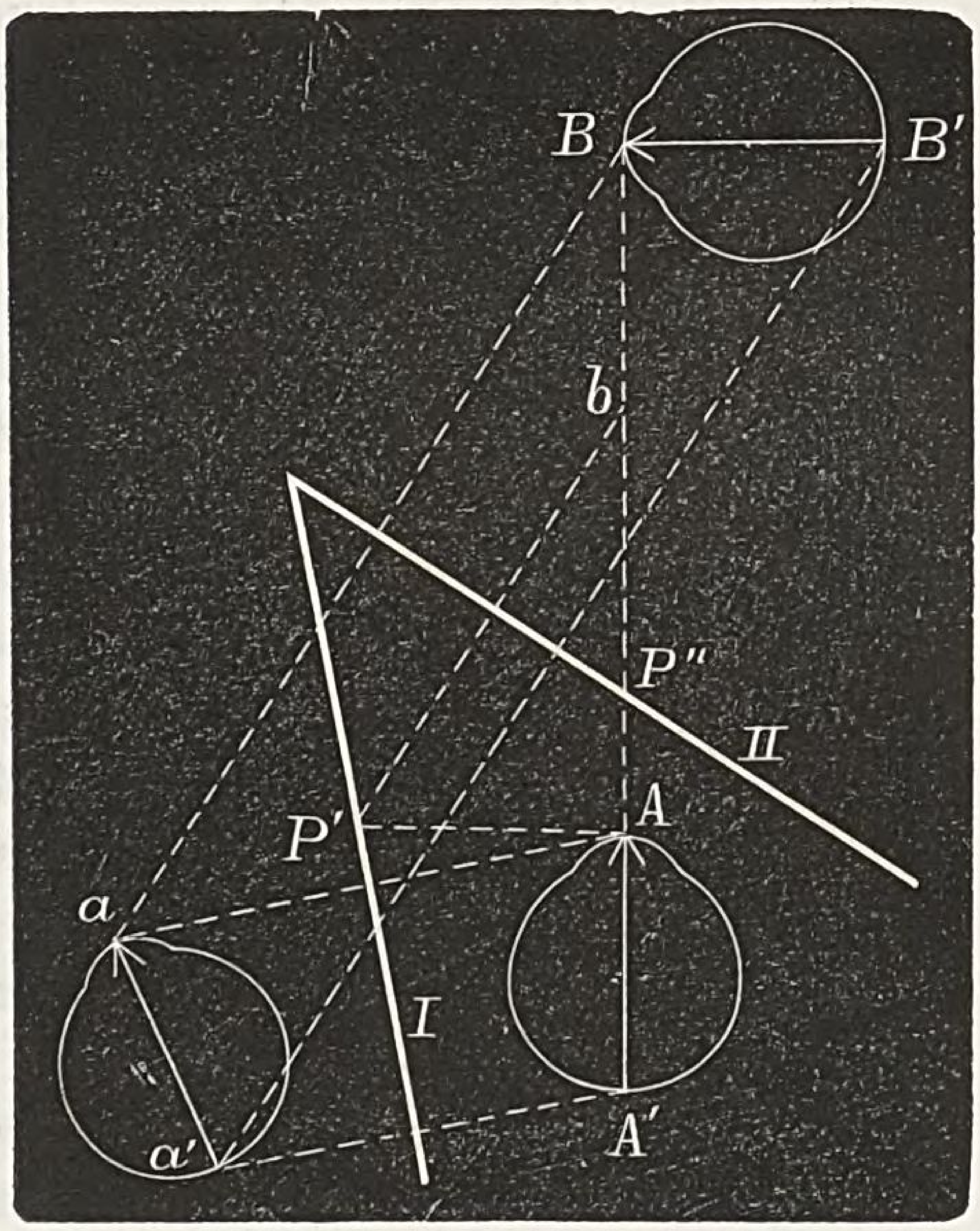


Fig. 40.

Berlin [1] hielt die Methoden Volkmann's und Woinow's, welche die jeweilige Lage der Hauptvisirlinie mit Hilfe der Deckung dunkler linearer Objecte controlirten, für nicht hinreichend genau und benutzte deshalb beim Visiren als fernere Objecte kleine Flammen und als nähere Objecte eine Nadel oder eine feine Spitze. Ausser der Lage der Hauptvisirlinie bestimmte er zugleich die Lage je einer indirecten zweiten Visirlinie und auf diese Weise die jeweilige Lage des Centrums der Visirlinien. Da jene zweite Visirlinie durch indirectes Sehen bestimmt werden musste, so benutzte er hier als näheres, die Flamme deckendes Object nicht eine Nadel oder Spitze, sondern die Kante eines dunklen Schirmes, den er bald von der

1 Berlin, Arch. f. Ophthalmologie XVII. (2) S. 150. 1871.

einen bald von der anderen Seite her so weit verschob, bis die indirect gesehene Flamme verschwand. Das Mittel der beiden Stellungen der deckenden Kante diente nebst dem Orte der Flamme zur Lagebestimmung der bezüglichen indirecten Visirlinie.

Sind W und V (Fig. 41) zwei leuchtende Punkte, N und L zwei Nadelspitzen, P und P' das Centrum der Visirlinien, so werden, wenn die Hauptvisirlinie in PW liegt, sowohl N und W als L und V sich decken. Wird dann der Blick bei fixirtem Kopf auf V gerichtet und liegt nun die Hauptvisirlinien in $P'V$ und das Centrum der Visirlinie in P', so wird V nicht mehr von L, und W nicht mehr von N gedeckt erscheinen, vielmehr muss L nach R und N nach K verschoben werden, damit dies der Fall ist. Sind die Punkte W, V, N, K, L und R bekannt, so lassen sich daraus die beiden Lagen NW und RV der Hauptvisirlinie und mit Hilfe der beiden indirecten Visirlinien LV und KW die beiden Lagen P und P' des Kreuzungspunktes der Visirlinien bestimmen. Ferner lässt sich der Durchschnittspunkt O der beiden Lagen PW und $P'V$ der Hauptvisirlinie und endlich der Abstand der beiden Orte P und P' des Centrums der Visirlinien vom Punkt O finden. Wird in dieser Weise eine grössere Anzahl verschiedener Lagen der Hauptvisirlinie und des Centrums der Visirlinien in einer Bahnebene bestimmt, zeigt sich dabei, dass die verschiedenen Orte des letzteren einem Kreisbogen angehören und dass sämmtliche Lagen der Hauptvisirlinie sich im Krümmungsmittelpunkte dieses Bogens durchschneiden oder wenigstens einen mit diesem Kreisbogen concentrischen Kreis tangiren, so hat sich das Auge bei der bezüglichen Bewegung um den Krümmungsmittelpunkt jenes Kreisbogens als um einen im Auge und im Raume festen Punkt gedreht. Schneiden sich die Lagen der Hauptvisirlinien nicht in einem Punkte, sondern tangiren einen Kreis, so liegt dabei der feste Drehpunkt ausserhalb der Hauptvisirlinie.

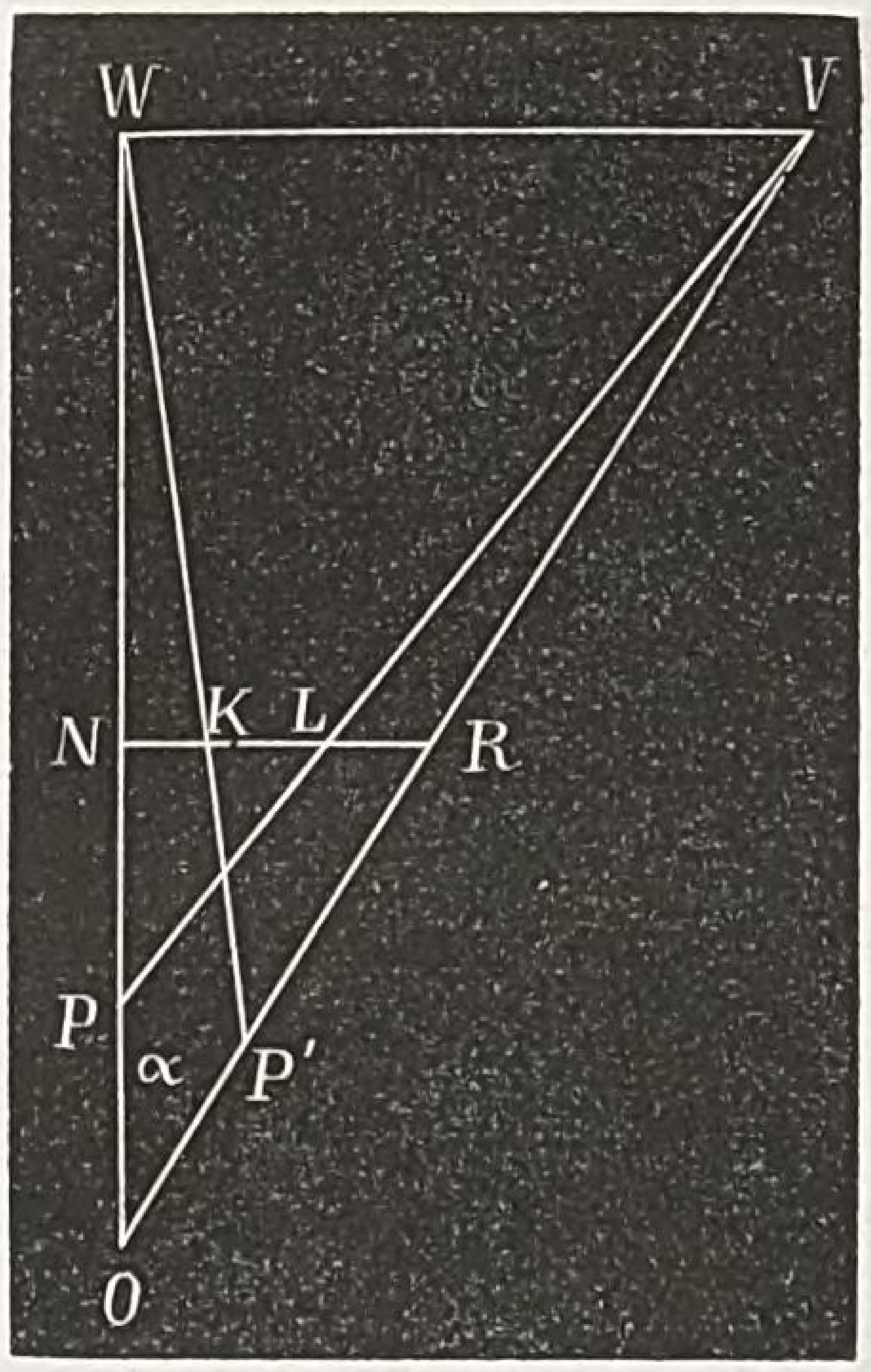


Fig. 41.

Berlin ging übrigens ebenso wie Volkmann von der unrichtigen Ansicht aus, dass wenn sich sämmtliche Lagen der Hauptvisirlinie in einem Punkte schneiden, dieser Punkt der im Augapfel feste Drehpunkt sein müsse. Er berechnete aus der Lage der Punkte W, V, N, L und R die Länge der Strecke OP, und wenn er diese für

verschiedene Grössen des Winkels WOV gleich gross fand, so schloss er, dass sämmtliche Lagen der Hauptvisirlinie sich in O durchkreuzt hätten und dies der feste Drehpunkt sei. Dieser Schluss ist jedoch nur dann zulässig, wenn auch OP' stets gleich OP gefunden wird, weil dann auch erwiesen ist, dass der Kreuzungspunkt der Visirlinie während der Drehung der Augen einen Kreisbogen beschrieben hat, dessen Krümmungsmittelpunkt in O liegt.

Da Berlin der Controle wegen auch die Strecke OP' mit bestimmte und sie wenigstens für sein rechtes Auge (Myopie $^1/_{14}$) in zwei für die primäre Blickebene gemachten Bestimmungen gleich OP fand, so lässt sich in der That schliessen, dass dieses Auge sich in dieser Bahn um eine im Raum und im Auge feste Axe drehte. Für das linke Auge (Myopie $^1/_{30}$) nahm bei Bewegungen in der primären Blickebene die Grösse von OP um so mehr ab, je weniger nach links oder je weiter nach rechts die zur Bestimmung benutzte seitliche Lage (RV) der Hauptvisirlinie von der Primärstellung abwich, während OP' umgekehrt zunahm. Hieraus schloss Berlin, dass der feste Drehpunkt nicht auf der Hauptvisirlinie selbst, sondern etwas abseits von derselben lag. Doch betrug dieser Abstand nach seiner Berechnung höchstenfalls nur 0,6 mm.

Der Ort des Drehpunktes im Augapfel. Die Methoden, deren sich Müller und Berlin zur Untersuchung der Frage bedienten, ob es überhaupt einen Drehpunkt giebt, gestatteten bejahenden Falls zugleich die Bestimmung von dessen Ort im Auge.

Müller fand bei aufrechtem Kopfe und bei Bewegungen des Blickes in der Horizontalebene in verschiedenen Versuchsreihen für den Abstand des Drehpunktes vom Durchschnittspunkte der Hauptvisirlinie mit der vorderen Cornealfläche Werthe, welche für das linke Auge (Myopie $^1/_{10}$) zwischen 14,2 und 15 mm. schwankten und als wahrscheinlichen Werth 14,56 mm. Für das rechte Auge (Myopie $^1/_{10}{}'$) schwankte dieser Werth zwischen 13 und 13,6 mm. und der wahrscheinliche Werth betrug 13,19 mm. Wurde der Kopf so weit nach vorn geneigt, dass die Neigung der horizontalen Blickebene relativ zur Frontalebene 20° betrug, so war der wahrscheinliche Werth für das linke Auge 15,16 mm., für das rechte 13,29 mm.; bei Senkung der Blickebene um 20° relativ zum Kopfe für das linke Auge 14,34 mm., für das rechte 12,87 mm.

Es ergab sich also für Müller, dass der Drehpunkt für Horizontalbewegung sich umsomehr vom Scheitel der Cornea entfernte, je stärker die Blickebene gehoben war.

Berlin bestimmte, wie oben auseinandergesetzt wurde, den Ab-

stand des Drehpunktes vom Centrum der Visirlinien oder von der Pupillarebene. Den Abstand des Cornealpols von dieser Ebene nahm er gleich 3,2 mm. und erhielt so für sein linkes Auge (Myopie $^1/_{30}$) bei aufrechtem Kopf und horizontaler Blickebene im Mittel 14,41 mm. als Abstand des Drehpunktes vom Cornealpol, für das rechte Auge (Myopie $^1/_{14}$) 14,66 mm.; bei Hebung der Blickebene um 22° für das linke Auge 14,81 mm., für das rechte 15 mm.; bei Senkung der Blickebene um 20° für das linke Auge 14,32 mm., für das rechte 14,19 mm. Dabei ist zu bemerken, dass nach Berlin's Berechnung der Drehpunkt im linken Auge nicht auf der Hauptvisirlinie lag, sondern für horizontale Blickebene 0,541 mm., für 22° Hebung derselben 0,652 mm., für 20° Senkung 0,281 mm. von jener Linie medianwärts abstand.

Diese Ergebnisse stimmen, wie die obigen Zahlen lehren, mit denen Müller's insofern überein, als auch dieser fand, dass der Drehpunkt sich um so mehr vom Cornealpol entfernt, je stärker die Blickebene gehoben ist. Für verticale Bewegungen des Blickes fand Berlin Werthe, welche im Mittel um 1,56 mm. kleiner waren, was er als Folge einer Verschiebung des Bulbus nach vorn betrachtet, welche bei der mit stärkerer Oeffnung der Lidspalte einhergehenden Hebung des Blickes eintrete.

Was die mechanischen Erklärungen betrifft, welche Müller und Berlin für die Lageänderungen des Drehpunktes bei verschiedener Hebung der Blickebene gegeben haben, so muss auf die citirten Abhandlungen derselben verwiesen werden, um so mehr als, wie aus den oben gemachten Andeutungen hervorgeht, die experimentellen Befunde theilweise eine andere Deutung zulassen, als ihnen von ihren Autoren gegeben wurde.

Volkmann[1] suchte, nachdem er durch die oben beschriebenen Versuche zur Ueberzeugung von der Existenz eines Drehpunktes gekommen war, dessen Lage im Auge auf folgende Weise zu bestimmen:

„Wenn ein mobiler Radius ac sich um den festen Punkt c dreht, so genügt es, den Winkel x des von ihm beschriebenen Bogens und die Sehne ab des letzteren zu kennen, um die Länge des Radius zu berechnen. Sie ist gleich dem Quotienten aus der halben Sehne durch den Sinus des halben Winkels." Die Strecke zwischen der Mitte der Pupille und dem Drehpunkte c des Auges diente als der mobile Radius, und es galt nun, für eine Drehung der Hauptvisirlinie, deren Winkel bekannt war, die Sehne des Bogens zu bestimmen, welchen dabei die Mitte der Pupille beschrieb. Zu diesem Zweck stellte Volkmann dem Auge gegenüber in einer Entfernung von un-

1 Volkmann l. c. S. 32.

gefähr 3 Meter ein Fernrohr auf, welches um das 25fache vergrösserte und mit einem Ocularmikrometer versehen war. Mit Hülfe dieses Instrumentes bestimmte er die Zahl der Theilstriche, durch welche der Mittelpunkt der Pupille bei einer Drehbewegung des Auges, deren Winkelgrösse durch die beiden Endlagen der Hauptvisirlinie gegeben war, hindurchgeht. Da er den Werth der Theilstriche für die Entfernung des Instrumentes vom Auge im voraus ermittelt hatte, so war mit der Zahl der Theilstriche die Grösse der fraglichen Sehne ohne weiteres gegeben.

Aus der so gefundenen Sehne und dem Winkel der Drehung bestimmte er den Abstand der Pupillenmitte vom Drehpunkte und addirte dazu, um den Abstand des letzteren vom Cornealpole zu finden, 2,36 mm. als den Abstand zwischen Hornhautpol und scheinbarer Pupillarebene. Es ergab sich ihm für horizontale Drehung als Mittel aus 51 Beobachtungen an 10 Personen 13,61 mm., für verticale Drehungen als Mittel aus 43 Beobachtungen an 10 Personen 13,37 mm., als Gesammtmittel aller Beobachtungen 13,54 mm. Ueber die Beschaffenheit der Augen der einzelnen Personen hat VOLKMANN nichts mitgetheilt. Für jede Person wurden Bestimmungen bei verschiedenen Grössen des Winkels der Drehung gemacht; die sich dabei ergebenden Verschiedenheiten der Werthe betrugen im ungünstigsten Falle nur 1,1 mm.

Diese Bestimmungen VOLKMANN's könnten nur dann strengere Gültigkeit haben, wenn die Voraussetzung eines festen Drehpunktes richtig wäre und wenn dieser Drehpunkt auf der Pupillaraxe läge.

WOINOW[1] bestimmte den Ort des Drehpunktes folgendermaassen. Nachdem er sein Auge in diejenige Lage zu den oben S. 457 erwähnten Linealen gebracht hatte, bei welcher die Theilstriche des näheren sich mit denen des ferneren deckten, und nun in bestimmter Richtung visirte, wurde von einem Assistenten ein Fernrohr seitlich von seinen Augen so eingestellt, dass der Verticalfaden des Fadenkreuzes den Scheitel der Hornhaut (welche der Assistent im Profil sah) zu tangiren schien. Nachdem dies geschehen war, brachte WOINOW eine Nähnadel an die Stelle, wo sich zuvor sein Auge befand, und bewegte dieselbe in der Richtung seines früheren Visirens hin und her, bis die Nadel dem Assistenten mit dem Faden des unverrückten Fernrohres zusammenzufallen schien. Jetzt ging die Nadel durch den Punkt, an welchem zuvor der Hornhautscheitel gelegen hatte. Aus der Entfernung der Nadel von dem in der Richtung des

1 WOINOW, Arch. f. Ophthalmologie XVI. (1) S. 249. 1870.

Visirens liegenden Striche des Lineals und der Entfernung desselben Striches von dem entsprechenden Striche des zweiten entfernteren Lineals liess sich durch die Abziehung der ersten Grösse von der zweiten der Abstand des Drehpunktes vom Scheitel der Cornea finden. Diese Methode führte Woinow zu dem Schlusse, dass der Drehpunkt seines rechten Auges 14,0 mm. und der des linken 14,1 mm. vom Scheitel der Cornea entfernt waren. Da die Länge der Augenaxe für Woinow's Auge nach seiner Angabe 21,826 mm. (bis zur empfindlichen Schichte der Netzhaut) beträgt, so wäre der Abstand des Drehpunktes vom hinteren Pole des Auges 7,85 mm.

Ausserdem bestimmte Woinow [1] nach einer der Berlin'schen ganz analogen, aber ohne Kenntniss der letzteren ersonnenen Methode den Abstand zwischen dem Centrum der Visirlinien und dem Drehpunkte seines Auges, indem er letzteren auf der Hauptvisirlinie annahm. Er fand diesen Abstand zwischen 10,97 und 11,05 mm. schwankend und bezieht diese Schwankungen auf Lageänderungen der scheinbaren Pupillarebene während der Accommodation. Nach der erstbeschriebenen Methode hatte Woinow den Drehpunkt 14 mm. hinter dem Hornhautpole gefunden; es müsste also der Abstand des Hornhautpoles von der scheinbaren Pupillarebene mit 3 mm. angenommen werden, um das Ergebniss der zweiten Methode mit dem der ersten in Einklang zu bringen.

Weiss [2] untersuchte nach einer im Principe schon von Junge [3] und von Donders [4] angewandten Methode, welche auf der Lagebestimmung eines Spiegelbildchens der Cornea bei verschiedenen Stellungen des Auges beruht und ebenfalls die Existenz eines Drehpunktes auf der Hornhautaxe voraussetzt.

Das untersuchte Auge wird so gerichtet, dass die Hornhautaxe in die Axe eines ihm gegenüber liegenden Ophthalmometers zu liegen kommt, wobei das Bild eines dicht über dem Fernrohre des Ophthalmometers befindlichen Lichtes hinter der Mitte der Hornhaut erscheint. Vor dem Auge wird ein verticales Haar aufgespannt, welches ebenfalls durch die Axe der Hornhaut und des Ophthalmometers geht. Dies Visirhaar, welches bei der angegebenen Stellung des Auges fixirt werden muss, wird nun, während ihm das Auge folgt, auf einem horizontalen Gradbogen, dessen Krümmungsmittelpunkt ungefähr in der Mitte des Augapfels liegt, um einen gemessenen Bogen (α) verschoben und mit ihm zugleich das Licht, so dass letzteres immer dieselbe relative Lage zum Auge behält. Das Bildchen des Lichtes erscheint jetzt, durch das Ophthalmometer gesehen, seitwärts,

1 Woinow, Arch. f. Ophthalmologie XVII. (2) S. 233. 1871.
2 Weiss, ebenda XXI. (2) S. 132. 1875.
3 Junge, Helmholtz's physiol. Optik S. 458.
4 Donders, Die Anom. der Refract. u. Accommod. S. 156. Wien 1866.

und sein Abstand von der Axe des letzteren wird bestimmt, indem der scheinbare Abstand (d) zwischen Bildchen und Haar ophthalmometrisch gemessen wird. Schliesslich wird noch der Krümmungsradius (r) der Hornhaut für deren Scheitelgegend gemessen. Nimmt man nun an, dass der Krümmungsmittelpunkt des oben erwähnten Gradbogens genau im Drehpunkt und letzterer auf der Hornhautaxe liegt, so ist der Abstand des Drehpunktes vom vorderen Hornhautpole $= \frac{d}{\sin \alpha} + \frac{r}{2}$.

Die ellipsoidische Form der Hornhaut kann, wie Weiss berechnet, bei dieser Methode keinen Fehler ergeben, der nicht innerhalb der Fehlergrenzen der Messung läge. Auch hat diese Methode den Vortheil, dass sie den Abstand des Drehpunktes vom Hornhautpol direct ergiebt und keine weitere Bestimmung des Abstandes zwischen Hornhautpol und Hornhautbasis oder scheinbarer Pupillarebene nöthig macht. Weiss bestimmte nach dieser Methode für 10 Augen die Lage des Drehpunktes und fand dessen Abstand vom Hornhautpole im Ganzen etwas kleiner als Donders (s. die Tabelle auf folg. S.). Unter jenen Augen befand sich nur ein emmetropisches, dessen Drehpunkt 12,899 mm. hinter dem Hornhautpole gefunden wurde.

Von den älteren Bestimmungen der Lage des Drehpunktes, welche alle von der Voraussetzung ausgingen, dass es einen solchen wirklich gebe, seien hier nur die Ergebnisse der Untersuchungen von Donders und Doyer [1] angeführt. Die Methode derselben ist folgende: „Man bestimmt, wie gross die Bewegungswinkel (mit gleichen Excursionen nach beiden Seiten) sein müssen, um die beiden Endpunkte des gemessenen horizontalen Durchmessers der Hornhaut, einen nach dem andern, mit demselben Punkte im Raume zusammenfallen zu lassen.“ Die Messung des horizontalen Cornealdurchmessers geschieht mit Hülfe des Ophthalmometers. Die Bestimmungen wurden nur für horizontale Blickbewegungen gemacht; da aber gerade für diese nach den Untersuchungen von Müller und Berlin ein fester Drehpunkt noch am ehesten wahrscheinlich ist, so wird der Werth dieser Bestimmungen durch das Hypothetische ihrer Voraussetzungen wohl wenig beeinträchtigt.

Vor dem Auge wurde ein horizontaler Gradbogen aufgestellt, dessen Mittelpunkt mit dem vermuthlichen Orte des Drehpunktes ungefähr zusammenfiel. Gegenüber dem Auge war ein Fernrohr aufgestellt, dessen Axe mit der Axe der Hornhaut zusammenfiel, wenn

1 Donders, Die Anom. der Refract. u. Accommod. S. 156.

ein bestimmtes Visirzeichen auf dem Gradbogen fixirt wurde. Ein verticales Haar war vor dem Auge so angebracht, dass es ebenfalls durch diese Axe ging, so dass also der Mittelpunkt des Fadenkreuzes, das Haar und die Hornhautmitte sich für den Beobachter deckten. Nun wurde ein zweites Visirzeichen, welches der Untersuchte immer fixiren musste, auf dem Gradbogen soweit seitwärts geschoben, bis der Hornhautrand sich mit dem Haare deckte und der Bogen abgelesen, um welchen das zweite Visirzeichen von dem ersten abstand. Dieselbe Bestimmung wurde nach der andern Seite hin gemacht. Beide Bogen zusammen wurden für den Winkel der Drehung genommen, welche das Auge ausführen musste, um nach einander das eine und das andere Ende des horizontalen Cornealdurchmessers in die verlängerte Axe des Fernrohres zu bringen. Aus diesem Winkel und dem Cornealdurchmesser wurde der Abstand des Drehpunktes von der Hornhautbasis berechnet und dazu 2,6 mm. addirt. Die Methode setzt voraus, dass der Drehpunkt auf der Cornealaxe liegt.

Die folgende Tabelle giebt die nach dieser Methode von Donders und Doyer und später von Mauthner[1] gefundenen Mittelwerthe in Millimetern für emmetropische, myopische und hypermetropische Augen.

	Länge der Sehaxe.	Lage des Drehpunktes			
		hinter der Hornhaut.	vor der hinteren Fläche der Slerotica.	hinter der Mitte der Sehaxe.	
1. E.	23,53	13,45	9,99	1,77	Donders und Doyer.
2. M.	25,55	14,52	11,03	1,75	
3. H.	22,10	13,22	8,88	2,17	
1. E.	24,98	13,73	11,25	1,24	Mauthner.
2. M.	27,23	15,44	11,79	1,82	
3. H.	23,08	13,01	10,07	1,47	

II. Die Augenbewegungen beim Fernsehen.

Wenn der Blickpunkt vom Orte *a* entlang einer horizontalen Geraden nach dem Orte *b* bewegt wird, ohne dass dabei der Kopf irgendwelche Bewegung macht, so ist die Ebene, welche durch den Drehpunkt eines Auges und durch die beiden Orte *a* und *b* geht, die von der Gesichtslinie dabei durchmessene Bahn. In der Senkrechten,

1 Mauthner, Vorles. über d. opt. Fehler d. Aug. S. 640. Wien 1876.

welche im Drehpunkte des Auges auf dieser Ebene errichtet wird, liegt die Axe der Drehung. Wenn der bei Beginn der Drehung mit dieser Senkrechten zusammenfallende Durchmesser des Auges auch während des ganzen Verlaufes der Drehung in dieser Lage beharrt, so ist derselbe die feste Axe der Drehung. Die Gesichtslinie könnte aber in genau derselben ebenen Bahn von Punkt *a* nach *b* bewegt werden, ohne dass doch die Drehung des Augapfels um einen während der Drehung feststehenden Durchmesser des Augapfels erfolgte. Man denke sich in das Auge eine starke lange Nadel so eingestossen, dass sie mit der Gesichtslinie zusammenfällt, und stelle sich vor, man fasse das in den Raum hinausragende Stück der Nadel an seinem Ende zwischen zwei Fingern und schiebe die Nadel in der Horizontalebene vorwärts, so dass sie wieder dieselbe Bahn beschreibt wie vorhin die Gesichtslinie des activ bewegten Auges. Dann könnte man während der Verschiebung die Nadel zugleich zwischen den Fingern etwas um sich selbst drehen und damit den ganzen, fest mit der Nadel verbundenen Augapfel um die Gesichtslinie rollen, soweit es seine lockeren Befestigungen an der Orbita gestatten. Diesenfalls nun würde die Drehung des Augapfels zwar ebenfalls immer um die zur Ebene der Bahn im Drehpunkt senkrecht stehende Linie erfolgen, aber es würde nicht während der ganzen Drehung ein und derselbe Durchmesser des Auges in dieser Verticalen bleiben, sondern wir würden, weil wir zugleich den Augapfel um die Nadel rollen, auch immer andere Durchmesser desselben in die verticale Lage und also mit der im Kopfe festliegenden verticalen Axenlinie zum Zusammenfallen bringen. Es würde somit in jedem Augenblicke ein anderer Durchmesser des Auges die jeweilige oder augenblickliche Drehungsaxe im Augapfel sein. Je nachdem man nun die Sache auffasst, kann man sagen, das Auge werde dabei um eine im Kopfe feststehende verticale Linie (Axe) gedreht, gleichzeitig aber auch um die Gesichtslinie gerollt, oder man kann, wenn man den jeweilig in jener verticalen Linie liegenden Durchmesser des Auges als die augenblickliche Drehungsaxe bezeichnet, sagen, der Augapfel werde successive um immer andere seiner Durchmesser oder um augenblickliche Augapfelaxen gedreht.

Da die erstere Auffassung anschaulicher ist, so wollen wir sie im Folgenden beibehalten.

Wenn die Gesichtslinie bei ihrer Bewegung eine irgendwie gelegene ebene Bahn durchmisst, so erfolgt also unserer Annahme gemäss die Drehung stets um eine im Kopfe feststehende Axe, welche im Drehpunkt auf der Bahnebene senkrecht steht, aber es kann

dabei entweder immer derselbe Durchmesser des Augapfels mit der im Kopfe festen Drehungsaxe zusammenfallen, oder es kann, weil gleichzeitig eine Rollung des Augapfels um die Gesichtslinie stattfindet, in jedem Augenblicke der Drehung ein anderer Durchmesser des Augapfels in die im Raume festliegende Drehungsaxe eintreten. Die erste Art der Drehung werden wir eine einfache Drehung des Auges, die zweite eine mit Rollung verbundene Drehung nennen.

Es gilt nun festzustellen, wie das Auge, wenn seine Gesichtslinie eine ebene Bahn beschreibt, sich wirklich dreht, ob einfach oder mit Rollung.

Diese Frage hat LISTING [1] auf Grund einer rein theoretischen Betrachtung mit einem Satze beantwortet, welcher als das LISTING'sche Gesetz bezeichnet wird, und welcher besagt, dass es eine, aber auch nur eine ganz bestimmte Lage des Augapfels in der Orbita und also auch nur eine bestimmte Stellung der Gesichtslinie relativ zu den drei Hauptebenen des Kopfes giebt, aus welcher heraus die Gesichtslinie in jeder beliebigen ebenen Bahn durch einfache Drehung und also ohne gleichzeitige Rollung bewegt werden kann. Diese ganz bestimmte Lage des Augapfels sammt seiner Gesichtslinie in der Orbita heisst die Primärstellung, jede andere wirklich vorkommende Lage der Gesichtslinie eine Secundärstellung. Denkt man sich also durch diese Primärstellung der Gesichtslinie und durch diejenige Secundärstellung, in welche sie übergeführt werden soll, eine Ebene gelegt, so ist nach jenem Gesetze der bei Beginn der Drehung zu dieser Ebene im Drehpunkte senkrecht stehende Durchmesser des Augapfels auch während des ganzen Verlaufs der Drehung die Drehungsaxe, und damit ist uns zugleich die Lage des ganzen Augapfels für jede dieser Bahnebene angehörige Secundärstellung der Gesichtslinie gegeben.

Rein theoretisch betrachtet könnte bei einer gegebenen Stellung der Gesichtslinie relativ zum Kopfe und zur Orbita der Augapfel sehr verschiedene Lagen in der Orbita haben, denn man kann sich den Augapfel um die feststehende Gesichtslinie gerollt denken, soweit es seine Anheftungen in der Orbita zulassen. Wir haben aber schon im ersten Capitel gesehen, dass, wenn bei aufrechtem Kopfe die Gesichtslinien horizontal und parallel geradeaus gestellt sind, auch die Netzhaut und somit der ganze Augapfel immer dieselbe Lage zu den drei Hauptschnitten des Kopfes hat; denn wir fanden

1 RUETE, Lehrb. d. Ophthalmologie S. 37. 2. Aufl. Vergl. auch LISTING's nachträgliche Bemerkungen in den Göttinger Nachrichten 1869. Nr. 17.

dabei, von ganz kleinen Abweichungen abgesehen, die Lage des mittlen Längsschnittes jeder Netzhaut als eine ganz bestimmte. Nach dem LISTING'schen Gesetze würde dasselbe für jede beliebige andere Stellung der Gesichtslinie zum Kopfe gelten. Jeder bestimmten Secundärstellung der Gesichtslinie entspräche auch eine ganz bestimmte Lage der Netzhaut und des Augapfels in der Orbita, und wenn uns diese Lage für die Primärstellung bekannt ist, so können wir sie nach jenem Gesetze auch für jede Secundärstellung finden. Wir denken uns dann durch die in dieser Secundärstellung befindliche Gesichtslinie und durch ihre Primärstellung eine Ebene gelegt und das Auge um den zu dieser Ebene senkrechten Durchmesser des Augapfels als feste Axe aus der Primärstellung in die gegebene Secundärstellung hineingedreht. Der Durchmesser also, welcher sowohl zur primären als zur gegebenen secundären Stellung der Gesichtslinie senkrecht liegt, ist derjenige, welcher bei beiden Augenstellungen dieselbe Lage in der Orbita hat. Wenn uns aber einerseits die Lage der Gesichtslinie, andererseits die Lage eines zweiten Durchmessers des Augapfels in der Orbita gegeben ist, so ist damit die Lage des ganzen Augapfels in der Orbita bestimmt.

HELMHOLTZ [1] hat zuerst durch Versuche bewiesen, dass das Auge bei symmetrischer Kopfhaltung und beim Fernsehen, wobei also die Gesichtslinien immer nahezu parallel sind, wirklich ziemlich genau nach dem LISTING'schen Gesetze bewegt wird, und dass, wenn wir bei aufrechtem Kopfe einen gerade vor uns in gleicher Höhe wie die Augen über dem Horizonte gelegenen fernen Punkt fixiren, beide Gesichtslinien entweder genau oder wenigstens sehr angenähert in ihrer Primärstellung sind.

Untersuchung mit Hülfe von Nachbildern. Am besten führt man den Beweis für die Richtigkeit des LISTING'schen Gesetzes mit einem linearen Nachbilde, das man sich auf einem passend gewählten Netzhautmeridiane erzeugt. Man setzt sich in erhöhter Stellung vor eine möglichst grosse und entfernte einfarbige Wand, so dass der Kopf sich ungefähr in gleicher Höhe mit dem Mittelpunkte der Wand befindet. Am Stuhle ist ein Kopfhalter befestigt, wie ihn die Photographen benützen. Ueber die Wand ist zunächst ein horizontales und ein verticales, z. B. rothes Band gespannt, und beide Bänder kreuzen sich in dem Punkte der Wand, der sich in gleicher Höhe mit den Augen und ungefähr in der Medianebene des Kopfes befindet. Auf der Mitte der Durchkreuzungsstelle der Bänder wird eine schwarze Marke angebracht, welche

1 HELMHOLTZ, Arch. f. Ophthalmologie IX. (2) S. 153. 1863.

als Fixationspunkt dient. Parallel dem verticalen Bande sind rechts und links, parallel dem horizontalen Bande oben und unten in regelmässigen Abständen schwarze Schnüre über die Wand gespannt, so dass dieselben ein rechtwinkliges Gitter bilden. Hat die Wand ein Muster, das in horizontaler und verticaler Richtung in regelmässigen Abständen wiederkehrt, so kann man sich die Schnüre ersparen. Man hält nun den Kopf zwanglos aufrecht und die Antlitzfläche parallel der Wand, bringt den beweglichen Kopfhalter an den Hinterkopf und befestigt ihn. Hierauf fixirt man anhaltend die schwarze Marke und lässt dann, nachdem man ein Auge geschlossen hat, den Blick langsam entlang dem horizontalen rothen Bande nach rechts oder links gehen, ohne den Kopf irgend zu verrücken. Dabei wandert das Nachbild des rothen Verticalbandes als ein grüner Strich mit dem Blicke über die Wand und erscheint immer parallel zu den schwarzen Verticalschnüren, falls das Auge sich während der Fixirung der Marke wirklich in der Primärstellung befunden hat. Das Nachbild des horizontalen Bandes wird diesenfalls gar nicht sichtbar, weil es immer mit dem Bilde des Bandes zusammenfällt. Kehrt man mit dem Blicke zur schwarzen Marke zurück, fixirt dieselbe wieder einige Zeit, um das Nachbild aufzufrischen, und lässt nun den Blick auf dem verticalen Bande hinauf oder hinabgleiten, so erscheint das mitwandernde Nachbild des horizontalen Bandes immer parallel den horizontalen Schnüren, falls die Anfangsstellung der Gesichtslinie die wirkliche Primärstellung war; das Nachbild des verticalen Bandes aber bleibt jetzt unsichtbar. War jedoch beim Fixiren der Marke die Gesichtslinie des benutzten Auges nicht in der wirklichen Primärstellung, so bleibt bei Rechts- und Linkswendung des Blickes das wandernde Nachbild des verticalen Bandes nicht parallel zu den verticalen Schnüren und das des horizontalen Bandes erscheint als ein das rothe Band im jeweiligen Fixationspunkte unter sehr spitzem Winkel schneidender grüner Strich; diesen Falls muss man den Kopf etwas vor- oder zurückneigen, bis man die richtige Stellung gefunden. Ist dies geschehen und man lässt nun den Blick am verticalen Bande hinauf oder hinuntergehen, und es erscheint jetzt das Nachbild des horizontalen Bandes nicht parallel mit den horizontalen Schnüren und wird das des verticalen als ein gegen dasselbe etwas verdrehter grüner Strich gesehen, so muss man den Kopf ein wenig nach rechts oder links um seine verticale Axe drehen, bis die richtige Stellung gefunden ist. Gelingt endlich der Versuch nach beiden Richtungen, so ist die Gesichtslinie in der Primärstellung.

Jetzt kann man den Versuch mit dem andern Auge wiederholen und man wird, wenn nur der Kopf eine gerade Haltung hat, finden, dass er auch mit diesem Auge gelingt. Ist die Wand zu nahe, so gelingt der Versuch mit keinem Auge genau, weil die Gesichtslinien erheblich vom Parallelismus abweichen und für convergirende Gesichtslinien nicht dasselbe Bewegungsgesetz gilt, wie für parallele. Ist aber die Wand mässig fern, so ist die Convergenz so gering, dass der daraus resultirende Fehler gegenüber den sonstigen Fehlerquellen der Methode nicht ins Gewicht fällt.

Man kann sich die Auffindung der richtigen Kopfstellung sehr erleichtern, wenn man ein von Helmholtz [1] angegebenes Visirzeichen benutzt, über dessen Gebrauch derselbe Folgendes angiebt:

„Um die Richtung der Primärstellung der Blickebene in Beziehung auf den Kopf zu fixiren, benutze ich ein Brettchen, welches ein Visirzeichen trägt und zwischen die Zähne genommen wird. Es ist in Fig. 42 in geometrischer Projection abgebildet. Das Brettchen *AB* (13 cm. lang, 4 cm. breit) hat bei *A* einen den Zahnreihen entsprechenden bogenförmigen Ausschnitt, bei *B* trägt es eine vierkantige hölzerne Säule, an der ein horizontaler Streif *CC* aus steifem Papier mit Klebwachs, und daher leicht verschieblich befestigt ist. Die Ränder des Ausschnitts *A* werden auf beiden Seiten mit einem Wulst von heissem Schellack bedeckt, und wenn dieses zu erhärten beginnt, drückt man die beiden Zahnreihen in den Schellack ab, indem man das Brettchen fest zwischen die Zähne nimmt. Ist das Harz erkaltet, so ist nachher die Lage des Brettchens zwischen den Zahnreihen unverrückbar festgestellt, und nach jeder Unterbrechung der Versuche immer wieder in genau unveränderter Weise herzustellen.

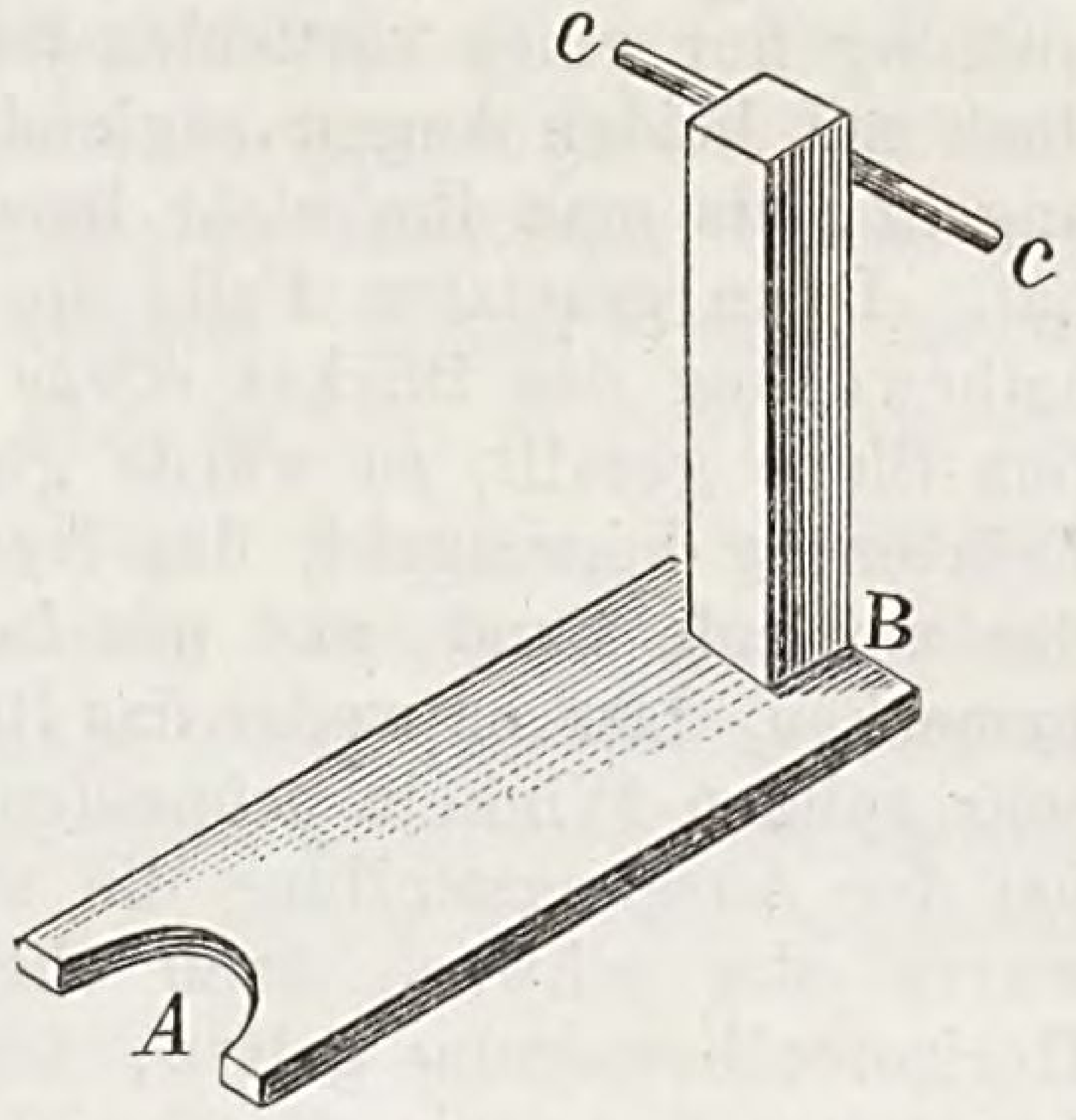


Fig. 42.

Der Papierstreifen *CC* wird so lang gemacht, als die Distanz der Drehpunkte der Augen. Man erkennt dies leicht, wenn man nach einem unendlich entfernten Objecte hinsieht. Dann erscheint der Papierstreifen in einem binocularen Doppelbilde; man macht ihn so lang und dreht ihn so, dass die einander zugekehrten Enden seiner Doppelbilder gerade auf einander stossen. Alsdann müssen die spitzen Enden des Streifens um die Entfernung der Drehpunkte (oder eigentlich der Centra der Visirlinien) beider Augen von einander entfernt sein.“ Der Streifen wird zunächst so angebracht, dass seine Spitzen und die fixirte Marke der Wand sich decken.

Sind nun bei der anfangs gewählten Kopfstellung die Nachbilder

1 Helmholtz, Physiol. Optik S. 517.

beim Wandern des Blickes den gleichgerichteten Schnüren nicht genau parallel geblieben, „so muss man den Papierstreifen des Visirbrettchens verschieben, bis man die richtige Stellung desselben gefunden hat. Und zwar muss man den Papierstreifen weiter nach links schieben, wenn man nach oben blickend das linke Ende des Nachbildes höher, nach unten blickend, dasselbe tiefer stehend findet. Findet man nach oben blickend dagegen das rechte Ende des Nachbildes höher, nach unten blickend dasselbe tiefer, so verschiebt man nach rechts. Man verschiebe den Streifen dagegen nach oben, wenn man nach links blickend das linke, nach rechts blickend das rechte Ende des Nachbildes tiefer stehend findet, und umgekehrt.“

Hering [1] hat die Grenzen der Genauigkeit dieser Methode untersucht und gefunden, dass die Einzelbestimmungen innerhalb eines Spielraumes variirten, welcher an den äussersten Grenzen des Blickfeldes bis auf 5° wuchs, sodass Abweichungen von 2° 30′ vom Mittelwerthe vorkamen.

Der eben beschriebene Nachbildversuch wurde, abgesehen von der Anwendung des Visirzeichens, im Wesentlichen ebenso und zwar mit Benutzung nur eines verticalen Bandes zuerst von Donders [2] angestellt, jedoch mit beiden Augen zugleich, was streng genommen in solange nicht angeht, als man ihn nicht bereits für jedes Auge besonders angestellt hat. Denn gesetzten Falls die beiden Augen hätten sich bei der Verticalbewegung des Blickes etwas um die Gesichtslinien in entgegengesetztem Sinne gerollt, so würde gleichwohl, wie aus der S. 433 gegebenen Erörterung hervorgeht, das Nachbild immer vertical erscheinen, ebenso das verticale Band, und nur bei sehr strenger Beobachtung würde man bemerken, dass entweder das Band oder das Nachbild in zwei sich unter sehr spitzen Winkeln schneidenden Doppelbildern erscheint, je nachdem bei der Ausgangsstellung die mittlen Längsschnitte vertical und parallel waren oder schwach nach oben divergirten. Analoges würde für die Horizontalbewegung gelten, falls dabei beide Augen sich in entgegengesetztem Sinne um die Gesichtslinie gerollt hätten.

Betreffs der sogleich zu besprechenden Bewegungen in schräger Richtung kam Donders zu keinem übersichtlichen Resultate. Doch schien sich aus seinen Versuchen der Satz zu ergeben, dass dem Auge bei jeder bestimmten Stellung der Gesichtslinie relativ zum Kopfe eine ganz bestimmte Lage in der Orbita zukommt, welchen Satz später Helmholtz als das *Donders'sche Gesetz* bezeichnet hat.

Der beschriebene Versuch lehrt nun zunächst, dass die Gesichtslinie aus der beim Fixiren der Marke gegebenen Stellung heraus in horizontaler und verticaler Richtung durch einfache Drehung des Auges bewegt wird. Denn denkt man sich während des Fixirens der Marke durch das Verticalband und den Drehpunkt des Auges eine verticale Ebene gelegt, so schneidet dieselbe die Netzhaut in demjenigen Meridian, auf welchem das Bild des verticalen Bandes

1 Hering, Beiträge zur Physiologie IV. S. 252. 1864.
2 Donders, Holländ. Beiträge 1. Heft. S. 135. 1846.

liegt. Wird nun das Auge, wie es das LISTING'sche Gesetz fordert, um den jetzt vertical stehenden Durchmesser des Augapfels gedreht, so können wir uns diese Ebene, welche die Richtungslinienebene des Nachbildes ist, mit gedreht denken. Dabei wird sie immer vertical bleiben und die verticale Wand in verticalen Linien schneiden. Auf diesen Schnittlinien der Wand aber wird das Nachbild erscheinen müssen. Analog wird bei Verticalbewegung des Blickes die Richtungslinienebene des Nachbildes vom horizontalen Bande die Wand immer in horizontalen Linien schneiden müssen, falls die Drehung um den bei der Primärstellung horizontalen und zur Gesichtslinie rechtwinkligen Durchmesser des Auges erfolgt.

Wenn man nach Erzeugung des Nachbildes der Bänder in der Primärstellung den Blick in irgend welcher krummen oder zickzackförmigen Bahn zu einem beliebigen Punkte des verticalen oder horizontalen Bandes überführt, so erscheint ersternfalls wieder das Nachbild des horizontalen, letzternfalls das des verticalen Bandes parallel zu den horizontalen, beziehentlich verticalen Schnüren, höchstens zeigt das Nachbild, wie HELMHOLTZ [1] angiebt, in den ersten Secunden eine kleine Abweichung, die sich aber wieder verliert. Daraus geht hervor, dass, wie es LISTING's Gesetz fordert, die Netzhaut und somit der ganze Augapfel immer wieder dieselbe Lage annimmt, sobald die Gesichtslinie wieder in dieselbe Secundärstellung kommt, gleichviel auf welchem Wege die Gesichtslinie in diese Secundärstellung gelangt ist; immer vorausgesetzt, dass der Kopf die oben erwähnte Haltung bewahrt und die Gesichtslinien annähernd parallel sind.

Um nun zu beweisen, dass die Gesichtslinie auch bei der Bewegung in einer schräg gelegenen ebenen Bahn aus der Primärstellung durch einfache Drehung des Auges und ohne gleichzeitige Rollung desselben bewegt wird, kann man den beiden sich immer rechtwinklig im primären Fixationspunkte schneidenden Bändern sammt dem Gitter der Parallelschnüre eine entsprechend geneigte Lage geben, was am leichtesten so geschieht, dass man Bänder und Schnüre auf einer sehr grossen um den primären Fixationspunkt drehbaren Tafel anbringt. Man kann dann für jede beliebige Neigung der Bänder feststellen, dass, wenn man mit dem Nachbild im Auge den Blick auf dem einen Bande hingleiten lässt, das Nachbild des andern immer sehr angenähert parallel zu den bezüglichen Parallelschnüren erscheint, womit das LISTING'sche Gesetz durchgängig bewiesen ist.

1 HELMHOLTZ, Physiol. Optik S. 467.

Wir haben in der Einleitung die gerade, aufrechte Haltung des Kopfes als seine Primärstellung und die bei dieser Stellung durch die Drehpunkte der Augen gelegte Horizontalebene als die primäre Blickebene bezeichnet; zugleich haben wir darauf hingewiesen, dass von der genaueren Bestimmung dieser Primärstellung des Kopfes später zu sprechen sei. Die Primärstellung der Augen giebt uns zu dieser Bestimmung das Mittel. Hat man bei horizontal liegender Blickebene und parallel gestellten Gesichtslinien dem Kopfe diejenige Haltung gegeben, bei welcher die Gesichtslinien sich in der Primärstellung befinden, so ist auch der Kopf in seiner Primärstellung und die Blickebene hat ihre primäre Lage relativ zum Kopfe. Deshalb heisst auch die bei Primärstellung des Kopfes durch die Drehpunkte der Augen gelegte Horizontalebene die primäre Blickebene.

Helmholtz[1], welcher zuerst die Gültigkeit des Listing'schen Gesetzes auch für die schrägen Bahnebenen der Gesichtslinien erwiesen hat, beschreibt seine zur genaueren Untersuchung benützte Methode folgendermaassen:

„Als Gesichtsfeld dient eine an der Wand befestigte grosse hölzerne Tafel, die mit hellgrauem Papier glatt überzogen ist. Um die Stellung des Kopfes vor dieser sicher fixiren zu können, ist vor ihr in einer für die Accommodation des Beobachters passenden Entfernung ein kleines Tischchen aufgestellt und mit eisernen Klammern am Boden befestigt. Auf dem Tischchen ist ein eiserner Halter mit beweglichen Armen befestigt, wie man ihn in chemischen Laboratorien vielfach gebraucht, und dieser hält ein Brettchen ähnlich dem der Fig. 42, aber ohne die Säule und das Visirzeichen. Das Brettchen dient nur dazu, dem Kopfe des Beobachters, wenn er die Zähne darauf fest beisst, eine sichere Stellung der Tafel gegenüber zu geben. Mittels der Zähne kann die Stellung des Kopfes viel besser gesichert werden, als durch irgend welche Befestigung, welche nur die Weichtheile desselben unmittelbar unterstützt. Ein zweiter verstellbarer horizontaler Arm des Halters wird so festgeschraubt, dass die Stirn gegen ihn anliegt. Auf der Tafel wird dann, dem einen oder andern Auge gegenüber, ein passend gefärbter Streif aus sehr steifem Papier oder dünnem Holz befestigt, der in seiner Mitte mit einem Stechknöpfchen, und um dieses drehbar, befestigt wird. Den Streifen mache ich entweder halb weiss und halb schwarz, oder halb grün und halb roth, so dass die Trennungslinie beider Farben der Länge des Streifens parallel durch die Mitte seiner Breite hinläuft. Diese Trennungslinie giebt dann ein gut gezeichnetes Nachbild. Ferner werden feine schwarze Fäden horizontal und vertical über die Mitte des Streifens gespannt, und die Stellung des Zahnbrettchens so lange geändert, bis die Nachbilder des horizontalen Streifens längs des horizontalen Fadens verschoben diesem parallel bleiben, und ebenso die Nachbilder des vertical gestellten Streifens längs des verticalen Fadens. Dabei ist aber zu bemerken, dass die Gesichtslinien parallel gehalten werden müssen, und um dies zu contro-

1 Helmholtz, Physiol. Optik S. 518.

liren, mache ich in der Entfernung meiner Augen von einander (68 Millimeter) Punkte auf den Stellen der Tafel, nach denen ich hinblicke, den einen dicht an der Linie, nach der ich hinblicke, den andern in gleicher Höhe seitwärts, so dass, wenn ich die beiden Punkte mit parallelen Gesichtslinien betrachte, sie sich scheinbar vereinigen."

„Auf diese Weise kann man die Primärlage des einen und andern Auges finden, — sie liegen bei mir um die Distanz der Augen selbst von einander entfernt, — dann kann man nachher dem Streifen, von dem das Nachbild gewonnen wird, beliebige schräge Richtungen geben und Fäden über seine Mittellinie hinspannen, um längs dieser die Nachbilder zu verschieben." Bringt man nach dem Vorschlage von Helmholtz auf der Mitte der Tafel ein kleines Stück Spiegelglas an, welches den Fixationspunkt trägt, so kann man die senkrechte Lage der Gesichtslinie zur Tafelebene mittels des Spiegelbildes der Pupille controliren.

Hering[1] untersuchte in ähnlicher Weise wie Helmholtz. Ein verticaler Holzrahmen, der durch ein inneres Kreuz in vier kleinere Quadrate getheilt ist, trägt in seiner Mitte nach hinten hin eine horizontale Axe, welche in einem an der Wand befestigten Lager ruht und um welche der Rahmen drehbar ist. Nach vorne ist der Rahmen zur linken Hälfte mit blauen, zur rechten mit orangefarbenem, vollständig ebenem Papier so überspannt, dass die gerade Trennungslinie beider Farben genau durch den Drehpunkt des Rahmens geht. In diesem Punkte ist eine lange feine Stahlnadel senkrecht zur Ebene des Papiers eingesteckt, welche also genau in der Verlängerung der Axe liegt, um welche der Rahmen drehbar ist. Parallel zur Trennungslinie der Farben sind feine Linien über das Papier gezogen, ausserdem eine durch den Drehpunkt der Tafel gehende quere Linie rechtwinklig zu den übrigen. Der Drehpunkt des Rahmens befindet sich in der Höhe der Augen.

Stellte er nun dieser Tafel das zu untersuchende Auge so gegenüber, dass ihm die feine horizontale Nadel in totaler Verkürzung, d. h. punktförmig erschien, so traf die Gesichtslinie senkrecht auf die Ebene des Papiers. Die Drehbarkeit des Rahmens gestattete leicht die Untersuchung auch für alle schrägen Bahnebenen. Um trotz der relativen Nähe der Tafel die Gesichtslinien parallel zu erhalten, stellte er einen zweiten Rahmen vor dem ersten und ihm parallel auf, über welchen verticale Fäden derart ausgespannt waren, dass jeder von seinen beiden Nachbarn denselben Abstand hatte, wie die beiden Drehpunkte beider Augen von einander. Richtete er die parallel gestellten Gesichtslinien auf die Tafel, so sah er diese Fäden einfach, trotzdem dass jeder einzelne ihm Doppelbilder gab. Es bildete sich ihm nämlich das ganze Fadensystem im rechten und im linken Auge auf annähernd correspondirenden Netzhautschnitten ab, wenngleich je zwei correspondirend gelegene Fadenbilder nicht von einem und demselben, sondern von zwei verschiedenen Fäden herrührten. Sobald aber die Bilder der scheinbaren Fäden in zwei zerfielen, war dies ein Zeichen, dass die Gesichtslinien nicht mehr parallel standen. Allerdings erhielt er, während z. B. das linke Auge auf den Drehpunkt der Tafel eingestellt war, im rechten Auge ebenfalls ein Bild

1 Hering, Die Lehre vom binocul. Sehen S. 74. Leipzig 1868.

dieser Farbengrenze, welches aber nur störend werden konnte, wenn die Lage des Nachbildes sich der horizontalen näherte.

Der von HERING bei diesen Versuchen benutzte, von DONDERS [1] für verschiedene Zwecke modificirte Kopfhalter (Fig. 43) war folgendermassen eingerichtet. Zwei verticale Metallsäulen sind in einem Stative oder auf einem horizontalen Tische eingefügt in einer Entfernung von einander, welche um die Hälfte grösser ist, als der Kopf breit. Nahe ihrem oberen Ende hat jede Säule eine horizontale Bohrung, in welcher eine kurze Axe drehbar ist, die nach beiden Seiten über die Säule hinausragt. Die Axe der einen Säule liegt genau in der gedachten Verlängerung der andern. Das medianwärts hervorragende Stück jeder horizontalen Axe ist vertical durchbohrt, und durch das Loch ein verticaler Messingstab von etwa 12 cm. Länge gesteckt, dessen oberes Ende etwas über die Axe hervorragt. Das obere Stück dieses Stabes ist mit Schraubengängen versehen, und durch zwei Schraubenmuttern, deren eine unter-, die andere oberhalb der durchbohrten Axe sitzt, kann der Messingstab hinauf und hinab und in jeder beliebigen Stellung festgeschraubt werden. An das untere Ende jedes dieser beiden verticalen Messingstäbe ist ein gleich dicker horizontal nach vorn gerichteter Stab von etwa 8 cm. Länge angesetzt, welcher also mit dem verticalen Stabe ein rechtwinkliges Knie bildet. Das freie Ende des horizontalen Knieschenkels ist wieder mit Schraubengängen versehen, und durch die horizontale Bohrung eines horizontalen Querbalkens gesteckt, welcher abermals durch zwei Schraubenmuttern an den horizontalen Schenkeln vor- und zurückgeschoben werden kann. Der horizontale Querbalken endlich trägt ein Brettchen mit einem Ausschnitte für die Zähne, welches um eine verticale Axe auf dem Querbalken drehbar, durch eine Schraube zu fixiren und im Uebrigen ganz so eingerichtet ist, wie das Brettchen des von HELMHOLTZ angegebenen Visirzeichens. Fasst man dieses mit Schellack belegte Brettchen mit den Zähnen, so kann man durch Hinauf- oder Hinabschrauben der beiden verticalen Messingstäbe das Brettchen sammt dem an ihm fixirten Kopfe hinauf- und hinabschieben; durch Vor- oder Zurückschieben des Querbalkens, welcher das Brettchen trägt, kann man letzteres und mit ihm den Kopf vor- oder zurückschieben, endlich kann man durch Drehung des Brettchens um

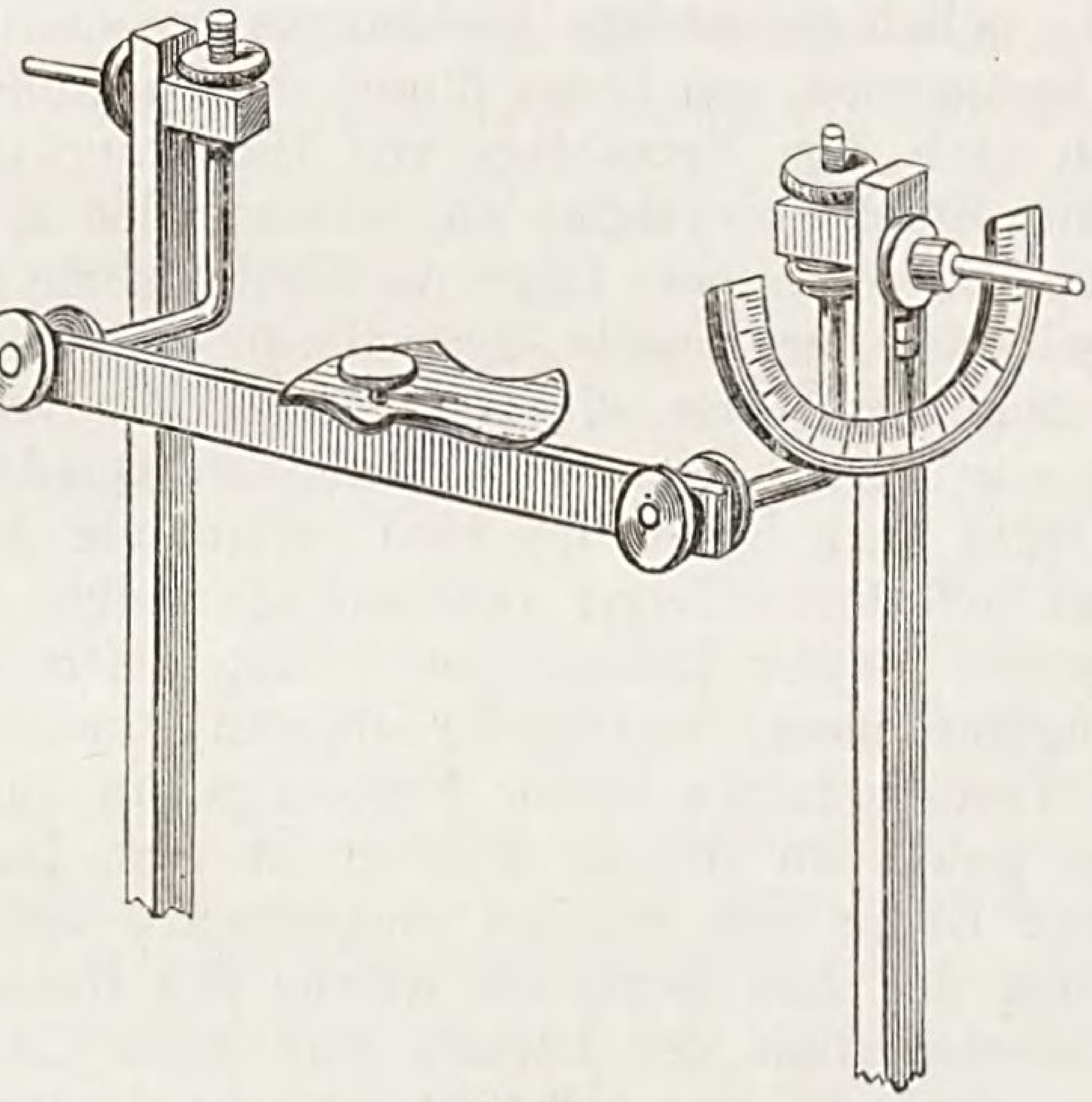


Fig. 43.

1 DONDERS, Arch. f. Ophthalmologie XXI. (1) S. 70 und (3) S. 110. 1875.

seine verticale Axe den Kopf nach links oder rechts drehen. Man kann also auf diese Weise dem Kopfe diejenige Stellung geben, bei welcher die Verbindungslinie der beiden Drehpunkte der Augen genau in die mathematische Axe fällt, um welche sich die beiden Metallaxen in den beiden Säulen drehen können. Da nun mit diesen Metallaxen das Zahnbrettchen verbunden ist, und in letzterem wieder der Kopf unverrückbar fixirt ist, so kann man mit Hülfe des Apparates den Kopf um jene Axe drehen und mittels eines an der Metallaxe befestigten Zeigers auf einem Gradbogen die jeweilige Neigung des Kopfes, beziehentlich der Blickebene ablesen. Hält man nämlich z. B. den Kopf zunächst aufrecht, und stellt die Blickebene horizontal, neigt dann den Kopf um 10° nach vorne, so hat sich die Blickebene um 10° gehoben, während die Drehpunkte beider Augen ihren Ort im Raume nicht geändert haben.

Um zu controliren, dass die Drehpunkte der Augen in der Drehungsaxe des Apparates liegen, stellt man vor dem am Brettchen fixirten Kopfe einen verticalen, der Frontalebene parallelen Spiegel auf und vor jedes Auge ein Fadenkreuz, dessen Ebene der Spiegelebene parallel und dessen einer Schenkel vertical, der andere horizontal ist. Beide Fadenkreuze haben einen der Augendistanz gleichen Abstand. Deckt sich für jedes Auge das Fadenkreuz mit seinem Spiegelbilde, so stehen die Gesichtslinien senkrecht auf der Spiegelebene. Dreht man nun, während man den Mittelpunkt des Fadenkreuzes fixirt, den Kopf im Kopfhalter nach vorn oder hinten, und bleibt dabei die Deckung zwischen Fadenkreuz und Spiegelbild erhalten, so dreht sich der Kopf um die durch beide Drehpunkte der Augen gehende Axe. Selbstverständlich muss man eine Entfernung des Spiegels und einen Abstand des Fadenkreuzes vom Spiegel wählen, bei welchem letzteres und sein Spiegelbild gleichzeitig ziemlich scharf gesehen werden können. Man findet durch Ausprobiren leicht diejenige Stellung des Zahnbrettchens, bei welcher für die beiden Augen die Verschiebung des Spiegelbildes auf ein Minimum gebracht wird; dann liegt derjenige Punkt des Auges in der Axe des Apparates, welcher für unsere Zwecke als der feste Drehpunkt des Auges angesehen werden darf.

Der Apparat erspart, wenn er einmal eingestellt ist, viel Zeit und Mühe, da man ihn dann zu den mannigfachsten Versuchen benützen kann, bei denen es darauf ankommt, die Augenstellung genau zu controliren und die absolute Lage des Drehpunkes zu kennen. Bringt man vor dem Apparate eine verticale Ebene an, welche der Drehungsaxe des Apparates parallel geht, und markirt die beiden Punkte, in welchen die horizontal und parallel geradeaus gestellten Gesichtslinien senkrecht auf die Tafel treffen, so kann man aus dem Abstande eines beliebigen, horizontal nach rechts oder links von diesen Punkten gelegenen Fixationspunktes den Winkel der Seitenwendung der bezüglichen Gesichtslinie leicht berechnen, insofern dieser Abstand dividirt durch den Abstand der Beobachtungsebene von dem Drehpunkte des Auges die Tangente des gesuchten Winkels giebt. Da man ausserdem am Apparate die jeweilige Neigung der Blickebene ablesen kann, so kennt man jederzeit genau die Lage der Gesichtslinie relativ zu den Hauptebenen des Kopfes.

Die Genauigkeit, mit welcher die Vergleichung der Richtung der

Nachbilder mit jener der Fäden nach derart verbesserten Methoden geschieht, geht nach Helmholtz bis zu einem halben Grade etwa. Er fand bei diesen Beobachtungen gewisse kleine Veränderungen, die von dem Wege abhingen, auf dem das Auge in die betreffende Stellung gebracht worden war, und selbst an verschiedenen Tagen zu wechseln schienen. Auch fand er die Primärstellung an einem Tage ein wenig höher, am andern tiefer, und sie veränderte sich sogar, während er eine Reihe von Versuchen ausführte.

Untersuchung nach der Substitutionsmethode. Eine zweite Methode zur Untersuchung der Netzhautlagen bei Parallelstellung der Gesichtslinien ist die schon im ersten Capitel beschriebene Substitutionsmethode. Dieselbe hat den Nachtheil, dass sie im Allgemeinen nur die relative Lage der beiden Netzhäute zu einander feststellt, nicht deren Lage in Bezug auf die drei Hauptschnittebenen des Kopfes, wie dies die Nachbildmethode thut. Nur wenn die Gesichtslinien parallel der Medianebene liegen, ergiebt sich daraus bei normalen Augen zugleich die Lage der Netzhäute in Bezug auf die Hauptebenen des Kopfes. Dagegen hat aber diese Methode den Vortheil einer viel grösseren Genauigkeit, welche nach Helmholtz bis auf $^1/_{10}$ Grad reicht. Hering [1] fand nach dieser Methode zunächst, dass, wenn die Gesichtslinien parallel der Medianebene liegen, die bei der Primärstellung verticalen Meridiane um so mehr nach oben divergiren, je mehr man die Blickebene relativ zum feststehenden Kopfe erhebt, um so mehr nach unten, je mehr man die Blickebene senkt, und dass also die mittlen Längsschnitte, wenn sie in der Primärstellung nach oben divergiren, ihre Divergenz bei Hebung der Blickebene verstärken, während sie bei der Senkung derselben allmählich parallel und sogar convergent nach oben werden können.

Abweichungen von Listing's Gesetz in diesem Sinne wurden später von Berthold [2], Helmholtz [3], Donders [4], Landolt [5], Le Conte [6] bestätigt.

Hering fand ferner, dass bei den meisten Parallelstellungen, welche irgend erheblich von der Primärstellung abweichen, der Parallelismus der in der Primärstellung verticalen Meridiane nicht genau erhalten bleibt und dass dabei Divergenzen und Convergenzen dieser

1 Hering, Beiträge zur Physiologie III. S. 175. 1863.

2 Berthold, Arch. f. Ophthalmologie XI. (3) S. 107. 1865.

3 Helmholtz, Physiol. Optik S. 523. 1867.

4 Donders, Onderzoek. ged. in het Physiol. Labor. Utrecht 3. R. II. p. 380. 1873 und Arch. f. d. ges. Physiol. XIII. S. 390. 1876.

5 Mitgetheilt von Aubert in Handb. d. gesammt. Augenheilk. von Graefe u. Saemisch II. S. 660. 1876.

6 le Conte, Amer. journ. of scienc. N. S. II. Vol. 49 (citirt nach Nagel's Jahresbericht f. Ophthalmologie 1872).

Meridiane oder genauer gesagt ihrer Richtungslinienebenen von mehreren Graden vorkommen, was später von vielen Seiten bestätigt wurde. Diese Abweichungen sind individuell verschieden, und Helmholtz meint, dass sie bei kurzsichtigen Augen stärker sind, als bei normalsichtigen. Es ist jedoch immer zu bedenken, dass diese Abweichungen nur dann erheblicher sind, wenn die Gesichtslinien weiter aus der Primärstellung herausgedreht werden, als beim gewöhnlichen Sehen der Fall ist. Denn wie oben gezeigt wurde, vermeiden wir alle stärker abweichenden Secundärstellungen der Gesichtslinie dadurch, dass wir den Kopf entsprechend wenden.

Messende Versuche über diese Anomalien, wie sie Berthold nannte, wurden dann von diesem mitgetheilt. Er gab an, dass sein kurzsichtiges ($^1/_{10}$) Auge dem Listing'schen Gesetze nicht folgt, dass aber die Abweichung für das gewöhnlich benutzte Blickfeld sehr unbedeutend ist und erst bei starker Erhebung und Senkung auffällig wird. Helmholtz [1] fand mit Hülfe der Substitutionsmethode Abweichungen, die für jedes einzelne Auge nur 9 Winkelminuten betrugen. Volkmann [2] für seine etwas kurzsichtigeren Augen Maximalabweichungen beim Blicke schräge nach unten rechts und links bis zu 54 Minuten für beide Augen zusammengenommen, also 27 Minuten für jedes Auge. Hering [3] kam auf Grund eingehender Untersuchungen zu dem Ergebniss, dass, abgesehen von den Veränderungen der Divergenz der mittlen Längsschnitte bei Hebung und Senkung der Blickebene, die Divergenz der ersteren wuchs, wenn bei beliebiger Neigung der Blickebene die Gesichtslinien nach rechts oder links gewandt wurden, und dass der Zuwachs hierbei um so stärker war, je stärker die Blickebene gehoben war. Die grösste Abweichung von Listing's Gesetz betrug 4°. Donders [4] fand die Anomalien im gewöhnlich benützten Gesichtsfelde kaum merkbar und erst gegen die Grenzen des Blickfeldes beträchtlich.

Volkmann untersuchte die Lage der Mittelschnitte bei verschiedenen Parallelstellungen nach der Substitutionsmethode von Hering mittels Halblinien, welche haploskopisch zu einer geraden Linie zusammengesetzt wurden (vergl. Capitel I); Berthold wesentlich nach derselben Methode, nur setzte er an Stelle der Halblinien frei durch den Raum gespannte Fäden, weil es ihm schwer fiel, die Gesichtslinien parallel zu halten. Er konnte so einen fernen Punkt fixiren, während doch jede Gesichtslinie durch das Ende je eines der beiden Halbfäden ging, welche haploskopisch zu einem scheinbar zusammenhängenden Faden vereinigt wurden.

Helmholtz beschreibt seine Methode folgendermassen: „Für die Prüfung der Parallelstellungen habe ich an einer verticalen Holztafel zwei durch kleine Gewichte gespannte Fäden aufgehängt, einen weissen vor schwarzem Grunde und einen schwarzen vor weissem Grunde. Die

1 Helmholtz, Physiol. Optik S. 468.
2 Mitgetheilt von Helmholtz ebenda S. 468.
3 Hering, Die Lehre vom binocul. Sehen S. 88. 1868.
4 Donders, Arch. f. d. ges. Physiol. XIII. S. 391. 1876.

Entfernung der Stifte, an denen die Fäden hingen, wurde so gewählt, dass bei den Beobachtungen die fixirten Mittelpunkte der Fäden die Distanz meiner Augen, 68 Millimeter, hatten. Nach unten hin lehnten sich die Fäden an zwei Nadeln, die in das Holz eingesteckt waren und die Fäden etwas convergiren machten. Hinter der Mitte der Fäden, die zu fixiren waren, war eine horizontale Linie gezogen, gerade in der Höhe meiner Augen. Die Fäden wurden mit parallel gerichteten Gesichtslinien betrachtet, wobei sie in denselben Ort des gemeinschaftlichen Sehfeldes zu liegen kommen, und die Nadel am untern Ende des einen wurde so lange verschoben, bis sich die Fäden nicht mehr kreuzten und bei schwacher Convergenz nicht mehr in divergenten, sondern in parallelen Bildern erschienen. Dadurch, dass man den Fäden verschiedene Farbe giebt, lässt sich ihre Congruenz im Gesichtsfelde besser beurtheilen, als wenn sie gleichfarbig sind, wobei sie leicht stereoskopisch verschmelzen, selbst wenn sie sich durchaus noch nicht decken. Wenn man sie als nahe Doppelbilder sieht, so erscheinen ihre Mitten getrennt und ihre Enden vereinigt. Man muss dann darauf achten, dass die Vereinigung nach oben und nach unten hin in derselben Weise vor sich geht.

Indem ich den Kopf vornüber und hintenüber neigte, konnte ich diese Versuche mit parallel gesenkten und parallel gehobenen Gesichtslinien wiederholen. Bei späteren Wiederholungen dieser Versuche fand ich es noch vortheilhafter, dem einen Auge als Object einen geradlinig begrenzten rothen Streifen von 3 Millimeter Breite, dem andern einen blauen Faden, beide auf schwarzem Grunde zu zeigen. Der Faden muss in der Mitte des rothen Streifens erscheinen".

Diese Methode unterscheidet sich von den übrigen wesentlich dadurch, dass ein horizontaler Faden im Gesichtsfelde war; ein solcher veranlasst, wie schon oben S. 359 erwähnt wurde und noch zu besprechen sein wird, die Augen zur Herstellung des Parallelismus correspondirender Meridiane, woraus sich vielleicht erklärt, dass Helmholtz kleinere Abweichungen fand, als andere Beobachter.

Zur Untersuchung nach der Substitutionsmethode diente Hering folgende Vorrichtung: „Auf einem horizontalen, ebenen Tische steht an einem Stativ befestigt eine verticale Tafel, die bis auf den Tisch herabreicht, und deren Vorderseite mit grauem Papier überzogen ist. In den Tisch sind vor der verticalen Beobachtungstafel die beiden Säulen des oben beschriebenen Kopfhalters eingeschraubt. Die Tafel läuft der queren Axe des Halters genau parallel und steht zunächst im Fernpunkte der parallel gestellten Augen. Auf ihr befinden sich zwei lange, fünfzehn Millimeter breite Messingstreifen so befestigt, dass der linke dem linken, der rechte dem rechten Auge gerade gegenüber liegt. Jeder von den beiden ist um denjenigen Punkt der Tafel drehbar, welcher mit dem Drehpunkte des gegenüberliegenden Auges auf gleicher Höhe und ihm genau gegenüber liegt. Die Drehpunkte der beiden Messingstreifen haben also dieselbe Distanz wie die Augen, und wenn die Gesichtslinien parallel geradeaus gestellt sind, so trifft jede im Drehpunkte des gegenüberliegenden Streifens senkrecht auf die Tafel. Der eine Streifen reicht nach unten, der andere nach oben bis nahe an den Rand der Tafel und trägt dort einen Nonius, welcher an einem graduirten Kreisbogen gleitet, so

dass man die Abweichung des Streifens von der verticalen Lage auf Minuten ablesen kann. Nach der anderen Seite reicht jeder Streifen weniger weit, um nicht durch zu grosse Länge die stärkere Verdrehung der Streifen gegeneinander zu hindern. Auf der vorderen Seite sind beide Streifen mit demselben grauen Papier überzogen wie die Tafel; ihre beiden Drehpunkte sind mit Tinte deutlich markirt. Der eine Streifen ist durch ein weisses Rosshaar genau längs halbirt, der andere trägt zwei schwarze parallel gespannte Rosshaare, welche, das eine um 1 mm. nach links, das andere um 1 mm. nach rechts vom Drehpunkte des Streifens abweichen. Wenn die beiden Drehpunkte der Streifen binocular verschmelzen, so erscheint das weisse Haar des einen Streifens zwischen den beiden

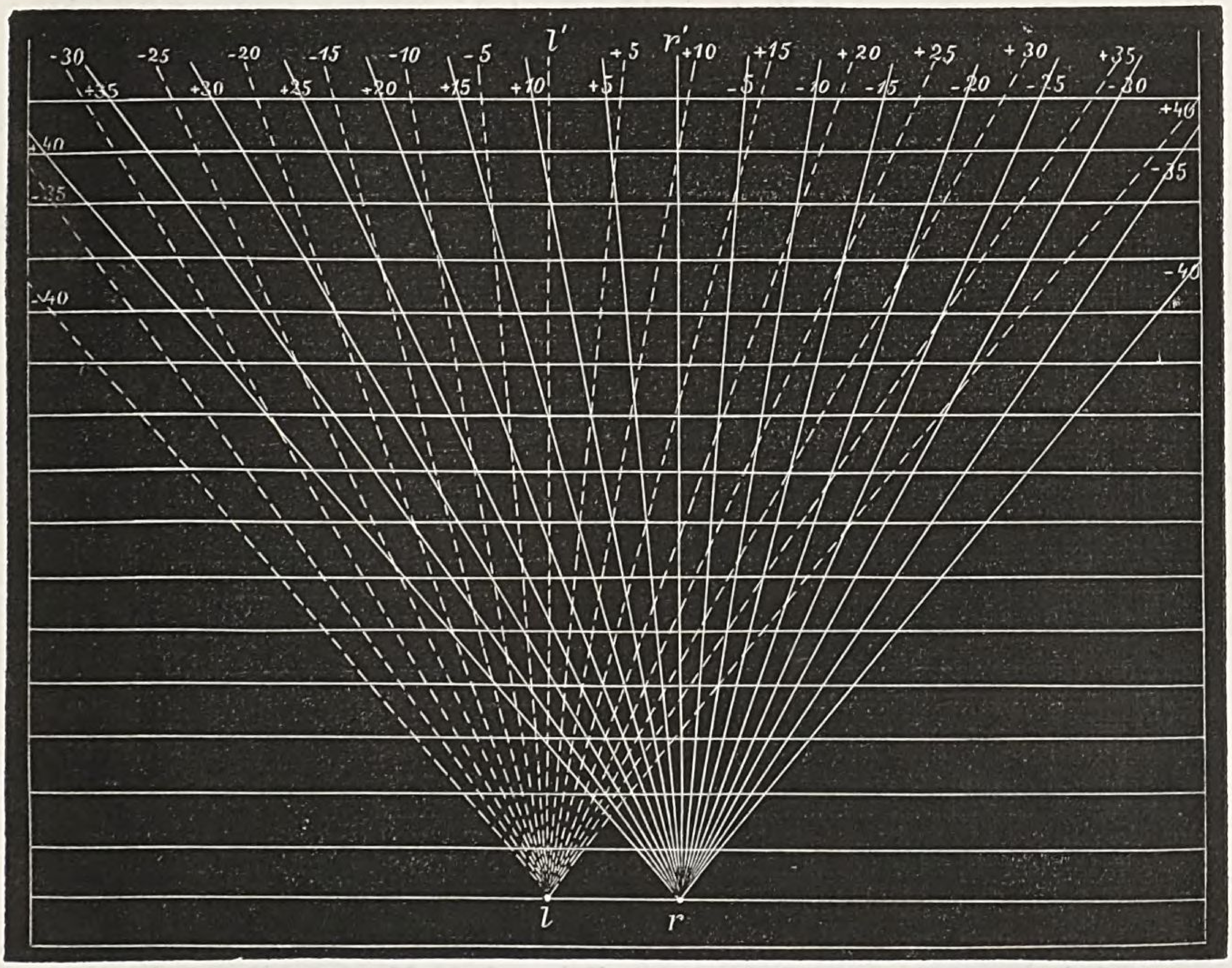


Fig. 44.

schwarzen, aber nur dann erscheinen alle drei parallel, wenn die Bilder der schwarzen Rosshaare auf der einen Netzhaut parallel zu demjenigen Netzhautmeridiane liegen, welcher mit dem, das Bild des weissen Rosshaares tragenden Meridiane der anderen Netzhaut correspondirt.

Die beiden Punkte (*l* und *r* Fig. 44) des Tisches, welche senkrecht unter dem Drehungspunkte der Augen liegen, sind markirt, und von jedem derselben ist eine gerade Linie (*ll'* und *rr'*) nach der verticalen Tafel hingezogen, welche rechtwinklig auf die untere Grenzlinie der Tafel trifft. Ausser diesen beiden Linien, welche so zu sagen die Projection der parallel geradeaus gestellten Gesichtslinien auf den Tisch darstellen, strahlen

von den Punkten *l* und *r* noch andere Linien radienförmig aus, welche unter einander um 5⁰ abweichen; die von dem einen Punkte ausgehenden sind roth, die anderen sind schwarz gezeichnet. Diese Linien stellen die Projectionen der um entsprechende Winkel innerhalb der horizontalen Blickebene nach rechts oder links gerichteten Gesichtslinien dar. Ausserdem sind zahlreiche quere Linien parallel der Tafel und der Verbindungslinie der Augendrehpunkte über den Tisch gezogen, welche um je einen Centimeter von einander abstehen. An diesen Linien kann man, wenn man die Tafel dem Gesichte näher oder ferner bringen will, controliren, dass dieselbe immer der Verbindungslinie der Augendrehpunkte parallel bleibt. Zwei kleine Zeiger am untern Rande der Tafel gestatten zugleich zu controliren, ob die Tafel die richtige Mittelstellung hat. Die Zeiger müssen dann auf die Linie *ll'* und *rr'* des Tisches treffen. Schiebt man dann die Tafel entlang einer Querlinie seitwärts, bis z. B. die beiden Zeiger auf die beiden Linien des Tisches treffen, welche je um 10⁰ von den mittlen Linien *ll'* und *rr'* nach rechts abweichen, und stellt die Gesichtslinien wieder auf die Drehpunkte der beiden Messingstreifen ein, so weiss man, dass jede Gesichtslinie um 10⁰ nach rechts von der Medianebene abweicht. Man kann also durch Verschiebung der Tafel den immer parallel bleibenden Gesichtslinien jede beliebige Seitenwendung nach rechts oder links geben, und zugleich den Grad der Seitenwendung auf dem Tische ablesen. Neigt man jetzt den Kopf vorwärts, so giebt der Zeiger des Kopfhalters an einem Kreisbogen an, um wie viel man die Blickebene relativ zum Kopfe gehoben oder gesenkt habe. Die Blickebene selbst bleibt dabei immer horizontal und rechtwinklig zur Beobachtungstafel, welche man wieder bei jeder beliebigen Kopfneigung nach rechts oder links verschieben kann. Aus der Stellung endlich, welche man den beiden Messingstreifen geben muss, damit die drei Rosshaare parallel erscheinen, kann man ersehen, welche relative Lage die beiden mittlen Längsschnitte zu einander haben. Man kann dabei entweder beide Streifen aus der Verticallage ablenken oder auch nur einen; ersterenfalls kann man aus der Summe der beiden Ablenkungswinkel, letzterenfalls aus dem einfachen Ablenkungswinkel den Divergenzwinkel der mittlen Längsschnitte d. h. den Winkel berechnen, um welchen die eine Netzhaut um die Gesichtslinie verdreht werden müsste, damit beide mittle Längsschnitte parallel lägen.

Fick [1] und nach ihm Meissner [2] haben die Netzhautlage bei den verschiedenen Stellungen der Gesichtslinie mit Hülfe des blinden Fleckes bestimmt. Doch giebt diese Methode minder genaue Resultate.

Drehung geradliniger Nachbilder bei einfacher Drehung des Auges. Angenommen, ein Auge befinde sich in der Primärstellung, seine Gesichtslinie liege horizontal und sei auf den Punkt *p* einer zur Gesichtslinie verticalen Wand gerichtet. Ist durch diesen Punkt auf der Wand ein verticaler farbiger Streifen gelegt, so wird derselbe sich auf dem verticalen Netzhautmeridiane

1 Fick, Molesch. Unters. V. S. 193.
2 Meissner, Ztschr. f. rat. Med. 3. R. VIII. S. 1. 1860.

abbilden und auf demselben bei anhaltender Fixation des Punktes *p* ein Nachbild erzeugen. Die ganze Wand sei durch verticale und horizontale Linien in Quadrate getheilt. Wird jetzt die Gesichtslinie bei unveränderter Kopfhaltung vertical nach oben und unten, oder horizontal nach rechts oder links verschoben, so erscheint, wie wir sahen, auch das Nachbild auf der Wand immer vertical; sobald aber der Blick in schräger Richtung auf- oder absteigt, erscheint das Nachbild schief. Analoges ist der Fall, wenn der farbige Streifen, dessen Nachbild man sich erzeugt hat, nicht vertical, sondern horizontal durch den Punkt *p* gelegt war. Oder hat man durch den Punkt *p* einen horizontalen und verticalen Streifen zugleich, d. h. ein farbiges rechtwinkliges Kreuz gelegt, so erscheint das Nachbild des Kreuzes rechtwinklig, ein Schenkel horizontal, der andere vertical, so lange der Blick auf eine durch den Punkt *p* gelegte horizontale oder verticale Linie der Wand gerichtet ist, das Kreuz erscheint dagegen schiefwinklig und seine Schenkel weder horizontal noch vertical, wenn der Blickpunkt irgend erheblich von jenen beiden Linien abweicht. Fig. 45 zeigt die Wand mit den horizontalen und verticalen Linien; das Kreuz in der Mitte bezeichnet das farbige Kreuz, durch dessen Fixirung das Nachbild erzeugt wird, die übrigen Kreuze bedeuten das Nachbild bei den verschiedenen Lagen des Blickpunktes. In *a*, *b*, *c* und *d* erscheint dasselbe verzerrt.

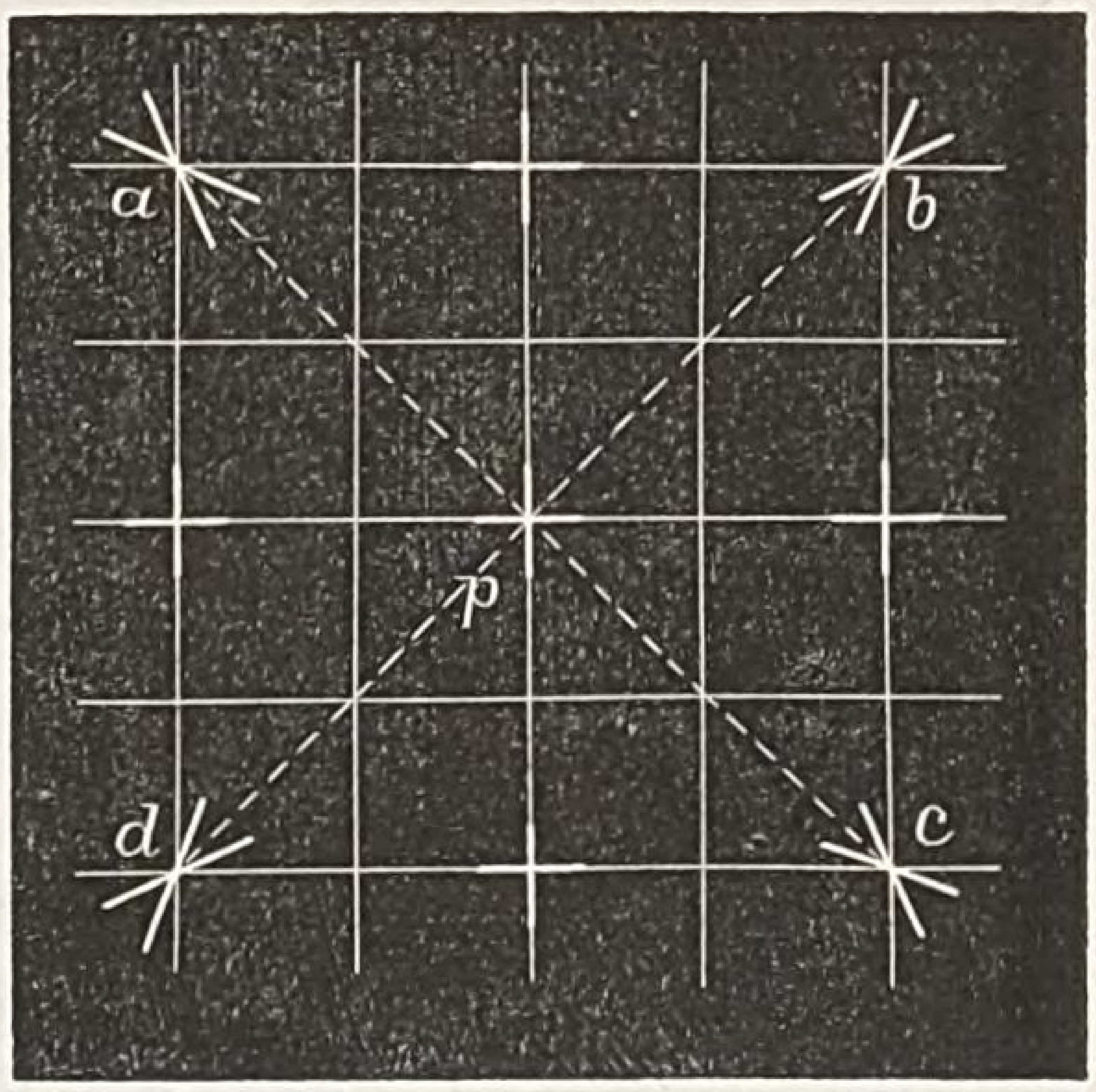


Fig. 45.

Diese Verzerrung ist eine Folge davon, dass die in Wirklichkeit rechtwinklig gekreuzten Linien der Wand sich auf der Netzhaut nicht auch rechtwinklig, sondern mit schiefwinkliger Durchkreuzung abbilden, sobald die Gesichtslinie in besprochener Weise schief zur Wand gestellt wird. Im Punkte *b* (Fig. 45) z. B. durchkreuzen sich auf der Wand eine horizontale und eine verticale Linie rechtwinklig; ist nun die Gesichtslinie auf diesen Punkt eingestellt, so projiciren sich die beiden Linien derart auf der Netzhaut, wie es die Linien *h h* und *v v* in Fig. 46 *A* darstellen, während das auf der Netzhaut liegende Nachbild des farbigen Kreuzes selbstverständlich nach wie vor rechtwinklig bleibt, wie es das Kreuz in derselben Figur zeigt. Da wir nun aber trotz dem schiefwinkligen Netzhautbilde die sich

kreuzenden Wandlinien doch rechtwinklig sehen, indem wir das verzerrte Netzhautbild auf ein zur Blickrichtung nicht rechtwinklig gelegenes, sondern der Frontalebene paralleles Sehfeld beziehen, und da wir also die vier Winkel *vah* (Fig. 46 *A*) sämmtlich als rechte sehen, so müssen wir nun umgekehrt die auf der Netzhaut rechten Winkel des Nachbildes schief sehen, und das Nachbild erscheint uns demnach wie in Fig. 46 *B*. Lediglich also die Art, wie wir das Netzhautbild in diesen Fällen auslegen, insbesondere der Umstand, dass wir trotz dem schiefwinkligen Netzhautbilde der verticalen und horizontalen Wandlinien dieselben doch nach wie vor vertical und horizontal sehen, ist die Ursache der besprochenen Verzerrung des Nachbildes.

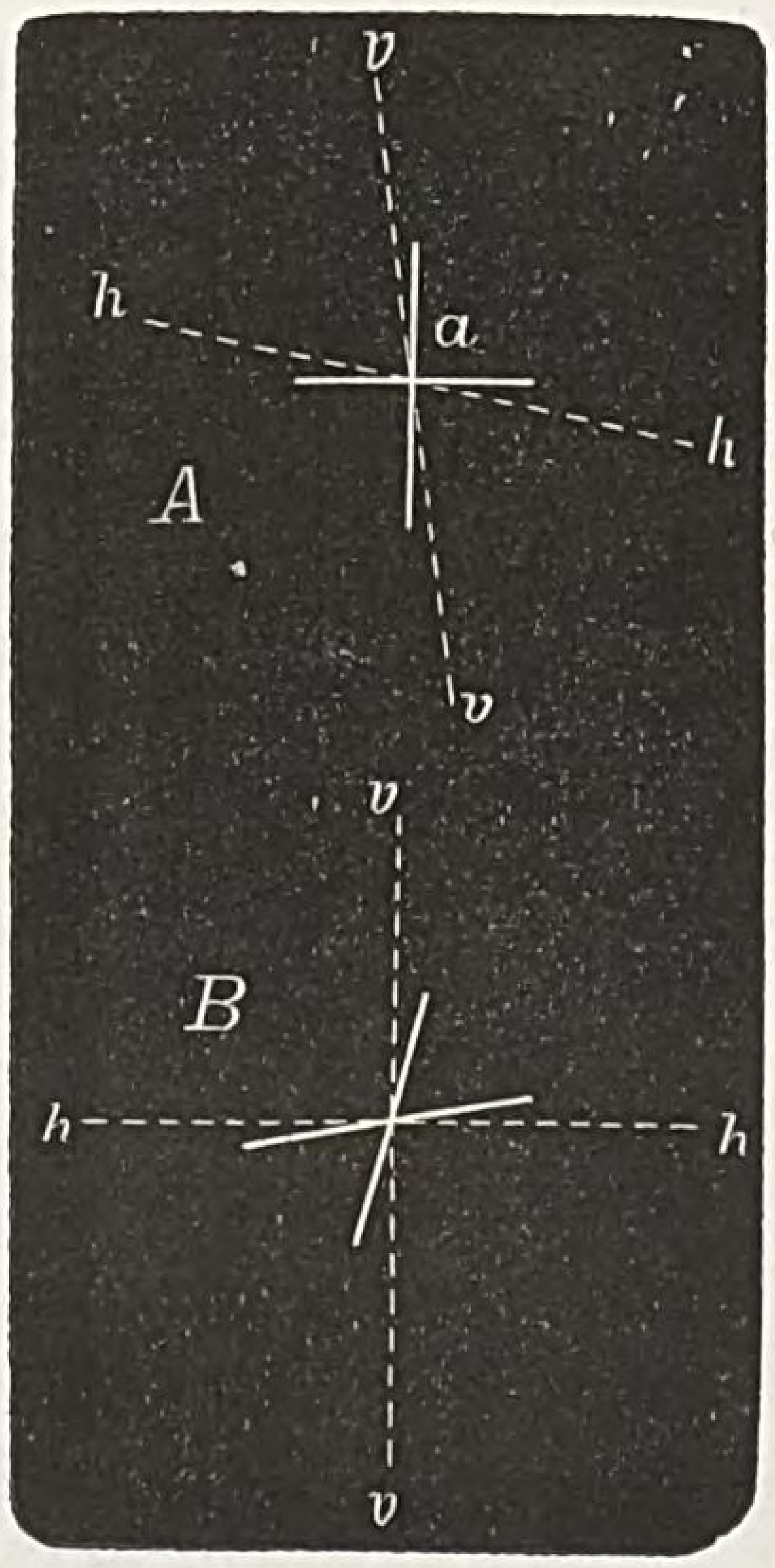


Fig. 46.

Gesetzt nun, wir hätten durch den primären Punkt *p* auf der Wand nur einen verticalen farbigen Streifen gelegt, uns ein Nachbild desselben erzeugt und dann den Blick entlang der schrägen Linie *p b* bis zum Punkte *b* (Fig. 45) geführt, so würde das Nachbild während dieser Bewegung scheinbar seine Lage geändert und sich mit dem oberen Ende nach rechts gedreht haben. Diess könnte, wie in der That vielfach geschehen ist, zu dem Irrthume verleiten, das Auge habe während dieser Bewegung eine Rollung um die Gesichtslinie erlitten, während doch die Ursache der scheinbaren Drehung des Nachbildes lediglich darin liegt, dass die verticalen Linien der Wand sich nicht mehr auf dem in der Primärstellung verticalen Meridiane oder ihm parallel abbilden, sondern ihre Bilder auf der Netzhaut sich während der Bewegung in Folge abgeänderter Projectionsverhältnisse auf der Netzhaut verdrehen. Hätte während der primären Fixirung des Punktes *p* der farbige Streifen horizontal gelegen, und würde dann die Gesichtslinie geradenwegs von *p* nach *b* übergeführt, so würde das Nachbild des Streifens bei dieser Bewegung ebenfalls eine scheinbare Drehung erleiden, aber entgegengesetzt als vorhin das Nachbild des verticalen Streifens, nämlich so, dass das linke Ende des Nachbildes sich nach unten neigt. Diese Abhängigkeit der Richtung der scheinbaren Drehung des Nachbildes von seiner Anfangslage beweist schon, dass nicht eine Rollung des Auges um die Gesichtslinie die Ursache der Erscheinung sein kann. Hätte der

farbige Streifen und mithin auch sein Nachbild bei der Primärstellung in der, die Punkte p und b verbindenden Geraden oder senkrecht zu derselben gelegen, so würde das Nachbild bei geradliniger Ueberführung des Blickes von p nach b keinerlei scheinbare Drehung erlitten haben, wie oben gezeigt wurde.

Man hat also, wenn man aus der scheinbaren Drehung des Nachbildes Aufschluss über die Orientirung der Netzhaut gewinnen will, zunächst zu beachten, ob und inwieweit jene scheinbare Drehung durch die veränderte Gestalt und Lage des Netzhautbildes desjenigen Aussenobjectes bedingt ist, auf welchem das Nachbild erscheint, und mit dessen Linien und Conturen die Lage des Nachbildes verglichen wird.

Will man mit Hülfe eines Nachbildes bestimmen, ob und wie eine Rollung des Auges stattfindet, während der Blick entlang einer beliebig im Raume gelegenen geraden Linie sich fortbewegt, so ist es also am zweckmässigsten, den zur Erzeugung des Nachbildes benützten Streifen seiner Länge nach in die Linie selbst zu legen, wie wir dies oben bei der Prüfung des Listing'schen Gesetzes gethan haben; bewegt man dann den Blick entlang dieser Linie und bleibt das Nachbild nicht in derselben, sondern dreht es sich aus derselben heraus, so ist jedesmal eine Rollung des Auges erfolgt, und zwar in demselben Sinne, in welchem sich das Nachbild zu drehen schien, jedoch nicht auch um denselben Winkel, weil der Winkel der Drehung des Nachbildes nicht bloss von der Rollung des Auges abhängig ist, sondern auch je nach der Lage der Fläche, auf welcher das Nachbild erscheint, grösser oder kleiner gesehen werden kann.

Bewegung des Auges aus den Secundärstellungen. Listing hat schon eine besonders wichtige Consequenz des von ihm aufgestellten Gesetzes betont. Nennen wir sämmtliche Ebenen, welche wir uns durch die in der Primärstellung befindliche Gesichtslinie gelegt denken können, die primären Bahnebenen, so folgt aus jenem Gesetze, dass, wenn die Gesichtslinie sich in irgend einer andern Ebene bewegt, die wir eine secundäre Bahnebene nennen wollen, ihre Bewegnng nicht durch einfache Drehung, sondern mit gleichzeitiger Rollung um die Gesichtslinie erfolgen muss.

Die Fig. 47 macht den Einfluss dieser Rollungen auf die Lage des Nachbildes anschaulich. Gesetzten Falls wir hätten, nachdem wir durch Fixirung von p in der Primärstellung das Nachbild eines kurzen verticalen Streifens erzeugt haben, den Blick nach p' gerichtet und von da aus entlang einer Verticalen hinauf oder hinab bewegt, so würde das Nachbild die in der Fig. 47 angegebenen

scheinbaren Lagen angenommen haben und sich also im Vergleich zur Verticalen verdreht haben. Dies beweist, dass das Auge während dieser Bewegung der Gesichtslinie, wobei letztere eine secundäre Bahnebene durchmass, zugleich eine Rollung um die Gesichtslinie erfahren hat. Denn wäre die Drehung des Auges ohne Rollung

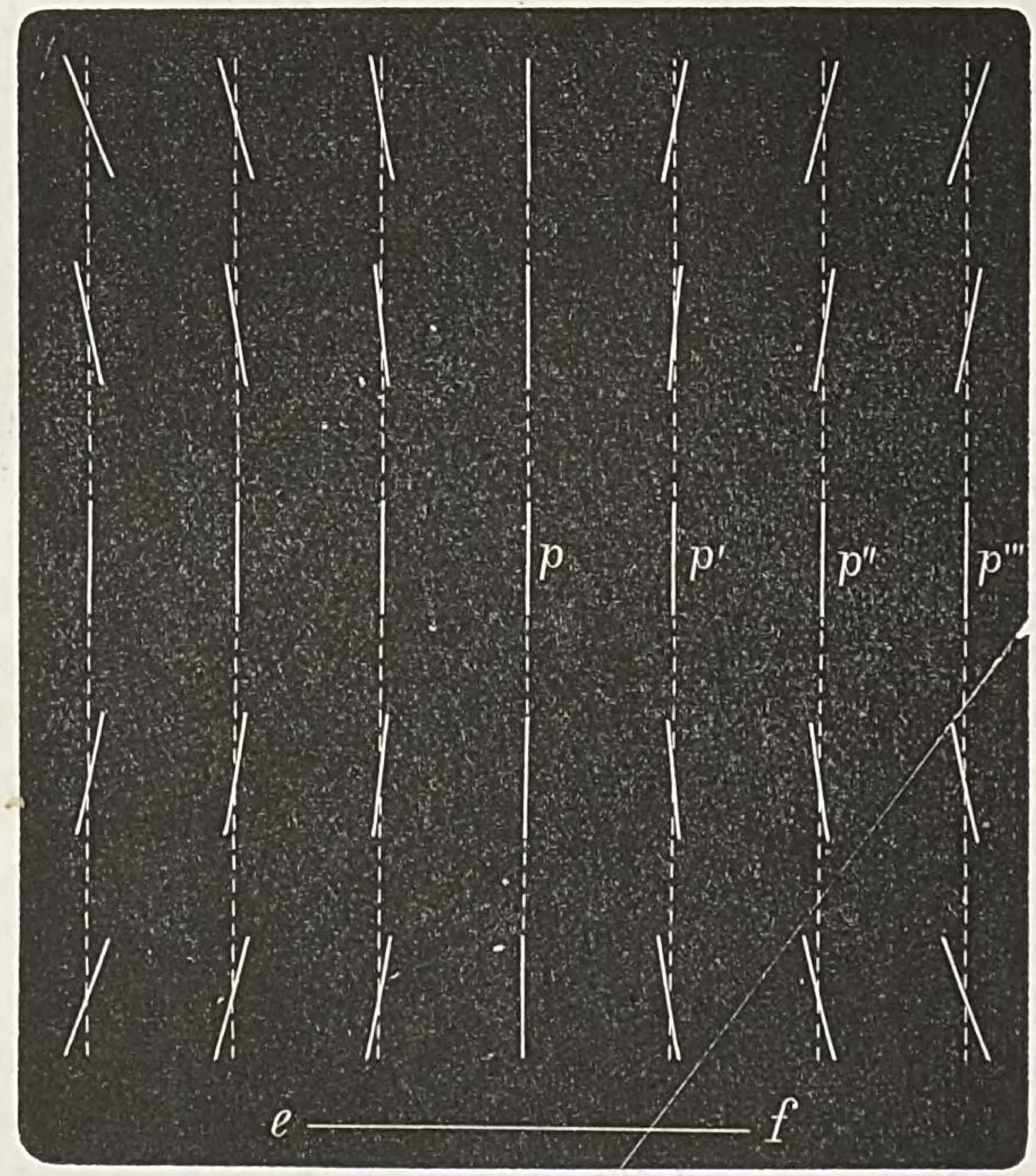


Fig. 47.

um eine zu dieser Bahnebene senkrechte Axe erfolgt, so wäre ja auch die Richtungslinienebene des Nachbildes immer in dieser Bahnebene und das Nachbild immer auf der Verticalen geblieben.

Die Fig. 47 zeigt überhaupt, welche scheinbaren Lagen ein ursprünglich verticales Nachbild beim Fernsehen auf einer verticalen Ebene bei den verschiedenen Stellungen der Gesichtslinie annimmt, vorausgesetzt, dass die Gesichtslinie bei der Primärstellung in dem Punkte p senkrecht auf die Ebene trifft, dass ferner der das Nachbild erzeugende Streifen vertical durch den Punkt p geht, der Kopf trotz der Bewegung des Auges unverrückt festgehalten wird und dass ef die Grösse des directen Abstandes zwischen dem Drehpunkte des Auges und der verticalen Ebene ist. Denkt man sich diesen Abstand und die Figur in demselben Verhältnisse vergrössert, so passt

die Figur für jede beliebige grössere Entfernung des Auges von der Verticalebene. Da, so oft die Gesichtslinie beim Fernsehen wieder in dieselbe Stellung kommt, auch die Netzhaut immer wieder dieselbe Lage in der Orbita hat, so wird auch das ursprünglich verticale Nachbild immer wieder dieselbe scheinbare Lage zeigen, sobald der Blick, unveränderte (aufrechte) Stellung des Kopfes und der Objectebene vorausgesetzt, wieder auf denselben Punkt fällt. Die Fig. 47 giebt also zugleich ein Bild der Lageänderungen, welche das Nachbild erleidet, während der Blick in irgend einer beliebigen Richtung über die Ebene hingleitet.

Steigt der Blick von rechts unten nach rechts oben, so dreht sich, wie die Figur lehrt, das Nachbild in demselben Sinne, wie der Zeiger einer von uns betrachteten Uhr. Geht der Blick an derselben Linie herab, so ist die Drehung entgegengesetzt. Steigt der Blick von links unten nach links oben empor, so dreht sich das Nachbild mit dem oberen Ende nach links; bei Senkung des Blickes von links oben nach links unten aber nach rechts. In demselben Sinne, wie hier das Nachbild, wenn auch nicht um denselben Winkel, ist nun auch bei den beschriebenen Bewegungen das Auge um die Gesichtslinie gerollt worden. Wir nennen den Rollungswinkel positiv, wenn der in der Primärstellung verticale Meridian der Netzhaut sich, von hinten gesehen, so gedreht hat, wie der Zeiger einer Uhr; andernfalls negativ.

Lassen wir den Blick nicht eine verticale, sondern andersgerichtete geradlinige Bahnen auf der verticalen Ebene durchlaufen, so sehen wir auch Drehungen des Nachbildes eintreten; aber diese sind zum Theile oder ganz die Folgen der veränderten Projection der Verticallinien auf die Netzhaut und geben uns nicht mehr direct an, ob und in welchem Sinne eine Rollung erfolgt sei. Will man für solchen Fall wissen, ob und in welchem Sinne eine solche eintritt, so denkt man sich die Fig. 47 um ihren Mittelpunkt p so weit gedreht, bis die ursprünglich verticalen Linien der Figur mit derjenigen Linie parallel liegen, entlang welcher der Blick hingleiten soll. Die in der Figur verzeichneten Nachbildlagen geben dann die Richtung der Rollung an. Gesetzt die Linie, welche der Blick durchlaufen soll, ist um 45^0 gegen den Horizont geneigt, so muss man die Figur um 45^0 um ihren Mittelpunkt drehen. Ginge dann der Blick entlang der gegebenen Linie, z. B. von links unten nach rechts oben, so würde, falls diese Linie unterhalb der Primärstellung der Gesichtslinie vorbeiläuft, die Drehung des Nachbildes und die Rollung des Auges positiv und um so grösser sein, je weiter die Linie vom Mittelpunkte

p des Blickfeldes abliegt. Wird die Fig. 47 soweit gedreht, dass die Längslinien horizontal liegen, so lehrt sie, dass, wenn die Gesichtslinie entlang einer Horizontalen oberhalb der Primärstellung hingleitet, die Rollung negativ ist, dagegen positiv, wenn die horizontale Blickbahn unterhalb der Primärstellung liegt. —

Da nach Listing's Gesetz das Auge aus der Primärstellung in jede Secundärstellung durch einfache Drehung um eine zur Gesichtslinie senkrechte Axe gedreht werden kann, so folgt, dass bei Primärstellung der Gesichtslinie alle diese Axen in der zur Gesichtslinie senkrechten Ebene, d. i. in der Aequatorialebene des Auges liegen. Diese Ebene heisse die primäre Axenebene.

Unter den vielen rein mathematischen Consequenzen des Listing'schen Gesetzes ist eine schon von Helmholtz betonte von besonderem Interesse. Wie aus der Primärstellung, so kann nämlich auch aus jeder Secundärstellung das Auge um einen seiner Durchmesser als feste Axe in jede beliebige andere Stellung gedreht werden, wobei aber die Gesichtslinie nicht eine ebene Bahn beschreibt, sondern eine krumme und zwar die Fläche eines Kreiskegels. Alle diese Axen, um welche die Gesichtslinie aus einer Secundärstellung in jede beliebige andere Stellung gedreht werden kann, liegen wieder in einer Ebene, welche eine secundäre Axenebene heissen soll, die aber jetzt von der Aequatorialebene des Auges abweicht. Dieselbe ist leicht zu finden.

Ist die Gesichtslinie aus der Primärstellung a um die Axe A und um den Winkel φ in die Secundärstellung b gedreht worden, so hat sich nothwendig dabei auch die Aequatorialebene des Auges um dieselbe Axe und um denselben Winkel gedreht. Legen wir nun durch die Axe A eine Ebene, welche den Winkel φ hälftet, der von der primären und der secundären Lage der Aequatorialebene eingeschlossen wird, so ist diese Ebene die Axenebene der Secundärstellung b. Diese Ebene weicht also um den halben Winkel φ sowohl von der Aequatorialebene des Bulbus als von der Frontalebene ab, in welcher die primäre Axenebene lag. Mit jeder Wendung der Gesichtslinie aus der Primärstellung in einer primären Bahnebene dreht sich im Kopfe die Axenebene um dieselbe Axe, wie das Auge, aber nur mit halb so grosser Winkelgeschwindigkeit; in Bezug auf die Aequatorialebene des Augapfels aber ändert sie ihre Lage im entgegengesetzten Sinne, weil die Aequatorialebene der Axenebene immer um das Doppelte voraus ist. Im Augapfel also dreht sich die Axenebene genau mit derselben Winkelgeschwindigkeit wie im Kopfe, aber in entgegengesetztem Sinne.

In Fig. 48 ist c der Drehpunkt, ca die Gesichtslinie in der Primärstellung, cb die Gesichtslinie in einer Secundärstellung, ee der Durchschnitt der zur Ebene acb senkrechten Aequatorialebene des Auges bei der Primärstellung und zugleich der Durchschnitt der primären Axenebene, $e'e'$ der Durchschnitt der Aequatorialebene für die Secundärstellung b, $\varepsilon\varepsilon$ der Durchschnitt der zur Secundärstellung b gehörigen secundären Axenebene. —

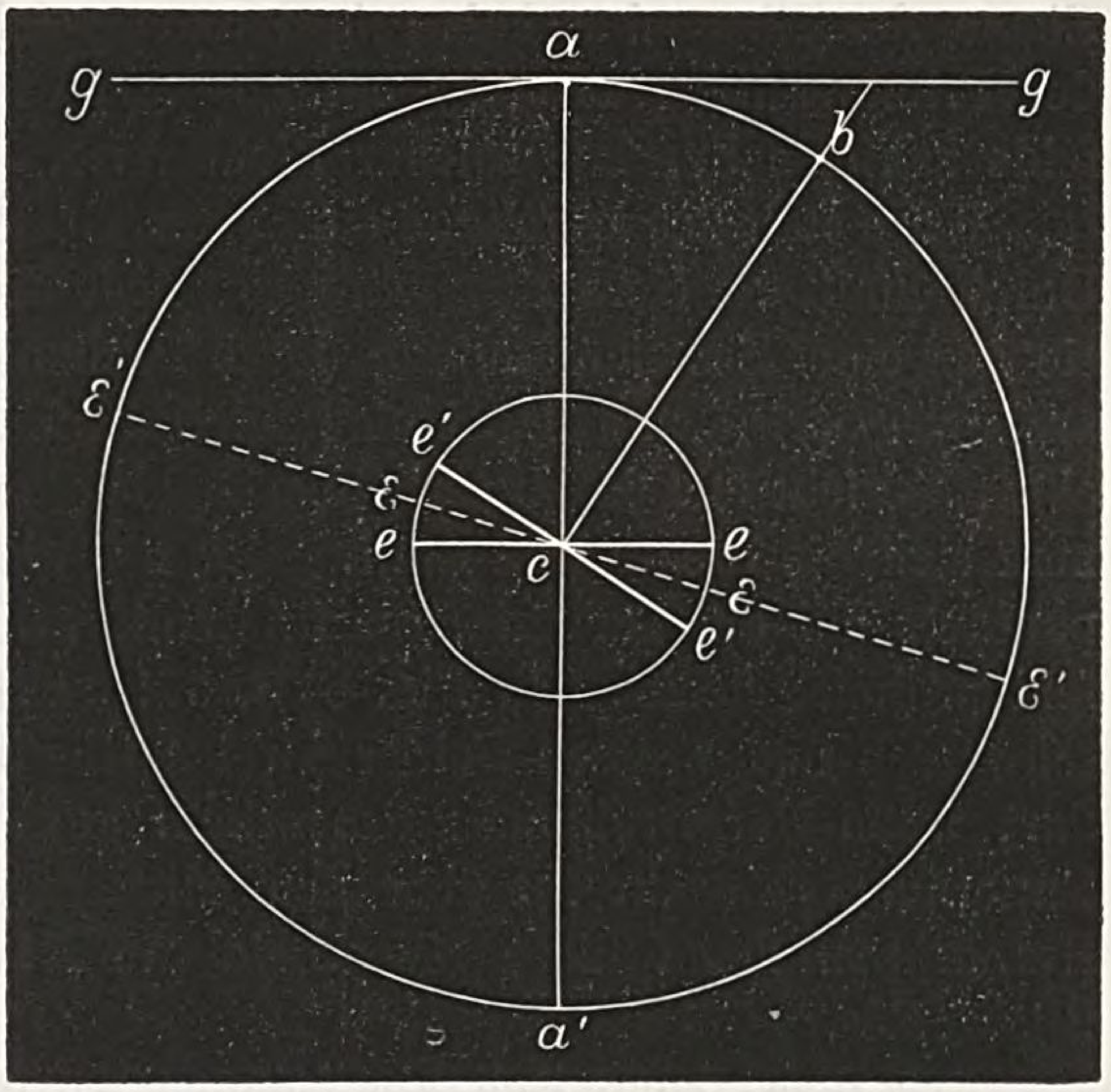


Fig. 48.

Denkt man sich das Auge aus der Secundärstellung b um die feste Axe $\varepsilon\varepsilon$ um 360^0 gedreht, so beschreibt die Gesichtslinie cb eine Kreiskegelfläche, deren Axe in $\varepsilon\varepsilon$ liegt und welche die Ebene der Zeichnung in cb und ca' durchschneidet. Die Gesichtslinie kommt also bei einer Drehung von 180^0 in die Linie ca', d. i. in die Verlängerung derjenigen Linie zu liegen, in der sie sich bei der Primärstellung befand. Genau dasselbe würde gelten, wenn wir statt von der Secundärstellung b von irgend einer anderen in derselben Ebene befindlichen Secundärstellung ausgegangen wären.

Ist $a\varepsilon'a'\varepsilon'$ der Durchschnitt eines kugeligen Gesichtsfeldes, dessen Krümmungsmittelpunkt im Drehpunkte c liegt, und a der primäre Blickpunkt auf diesem Gesichtsfelde, so beschreibt die Gesichtslinie, wenn sie aus der Secundärstellung b um die Axe $\varepsilon\varepsilon$ um 360^0 gedreht wird, auf diesem Gesichtsfelde einen Kreis, dessen Ebene senkrecht auf der Ebene der Zeichnung steht und dieselbe in a' und b durchschneidet. Dieser Kreis ist die Durchschnittslinie der kegelförmigen Bahn der Gesichtslinie mit dem kugeligen Gesichtsfelde. Da die Secundärstellung b beliebig in der gegebenen Ebene gewählt werden kann, so erhält man für jede in der letzteren gelegene Secundärstellung der Gesichtslinie einen solchen Kreis auf dem kugeligen Gesichtsfelde. Alle diese Kreise stehen auf der Ebene der Zeichnung senkrecht und berühren sich sämmtlich im Punkte a'. Eine in diesem

Punkte auf der Ebene der Figur errichtete Senkrechte ist die gemeinschaftliche Tangente aller dieser Kreise. Helmholtz nennt den Punkt a' den Occipitalpunkt und die beschriebenen Kreise die Richtkreise des Gesichtsfeldes. Da die Ebene $a\varepsilon a'\varepsilon$ eine ganz beliebige Ebene des Ebenenbüschels sein kann, welches die Gesichtslinie in der Primärstellung zur Axe hat, so giebt es im kugeligen Gesichtsfelde zahllose Systeme solcher Richtkreise.

Wäre statt des kugeligen ein ebenes Gesichtsfeld gegeben, dessen Durchschnitt die Gerade gg wäre, so würde die Gesichtslinie, während sie aus einer Secundärstellung durch Drehung um eine feste Axe herausbewegt wird und dabei eine Kreiskegelfläche beschreibt, dieses ebene Gesichtsfeld in Hyperbeln schneiden, welche man erhält, wenn man sich die Richtkreise des kugeligen Gesichtsfeldes aus dem Drehpunkte c auf das zur primären Blicklinie senkrechte ebene Gesichtsfeld projicirt denkt. In Fig. 8 S. 371 stellen die Grenzlinien der schwarzen und weissen Felder zwei solche Systeme von Hyperbeln dar, wenn der Drehpunkt des primär gestellten Auges sich in der Entfernung ee senkrecht über dem Mittelpunkte der Figur befindet. Helmholtz nennt diese Hyperbeln die Richtlinien des ebenen Blickfeldes.

Aus dem theoretisch abgeleiteten Satze, dass das Auge beim Fernsehen aus jeder beliebigen Stellung in jede beliebige andere durch Drehung um eine feste Axe übergeführt werden könnte, ohne gegen das Listing'sche Gesetz zu verstossen, ist von Einigen der weitere Schluss gezogen worden[1], dass diese Art der Drehung auch in Wirklichkeit für gewöhnlich stattfinde, so oft die Gesichtslinie ohne bestimmt vorgeschriebene Bahn von einem Punkte zu einem andern geht. Dies ist nicht nur keineswegs bewiesen, sondern es sprechen sogar die oben (S. 450) mitgetheilten Versuche von Wundt und Lamansky entschieden dagegen. Die Gesichtslinie durchläuft also, wenn sie bei fixirtem Kopfe von einer Stelle des Blickfeldes zu einer andern zwanglos übergeführt wird, nicht nothwendig die Richtlinien des Blickfeldes.

Was im Obigen als Rollung bezeichnet wurde, wird gewöhnlich Raddrehung genannt. Man hat aber auch unter Raddrehungswinkel den Winkel verstanden, um welchen der, bei der Primärstellung in der Blickebene gelegene Netzhautmeridian bei Secundärstellungen von der Blickebene abweicht, und welcher gleich ist dem Winkel, um welchen der bei der Primärstellung verticale Meridian von der zur Blickebene

1 Küster, Arch. f. Ophthalmologie XXII. (1) S. 200—205. 1876 und Donders Arch. f. d. ges. Physiol. XIII. S. 379. 1876.

verticalen Lage abweicht. Aus dem Listing'schen Gesetze, welches jedoch, wie sich zeigen wird, nur für das in die Ferne sehende Auge gültig ist, folgt, dass der bei der Primärstellung verticale Meridian (wohl zu merken nicht der mittle Längsschnitt) mit dem oberen Ende nach links von der zur Blickebene verticalen Lage abweicht, und der primäre horizontale Meridian mit dem linken Ende unter die Blickebene gedreht ist, wenn die Gesichtslinie im rechten oberen oder linken unteren Viertel des Blickraumes liegt, während das Entgegengesetzte der Fall ist, wenn sie sich in den beiden anderen Vierteln befindet. Dabei ist der Blickraum als durch eine horizontale und eine verticale Ebene getheilt gedacht, welche durch diejenige horizontale Linie gelegt sind, mit der die Gesichtslinie in der Primärstellung zusammenfällt. Helmholtz hat die Winkel dieser Meridianabweichung für die verschiedenen Stellungen der Gesichtslinie unter der Voraussetzung der strengen Gültigkeit des Listing'schen Gesetzes berechnet, und in der folgenden Tabelle zusammengestellt. Die Abweichung der Blickebene von der primären Lage ist darin als Erhebung bezeichnet, da man die Senkung als negative Hebung betrachten kann. Die seitliche Abweichung von der meridianen Richtung, welche die Gesichtslinie in der gehobenen oder gesenkten Blickebene hat, ist als Seitenwendung bezeichnet. Die Tabelle gilt für alle vier Viertel des Blickraumes, nur muss man bedenken, dass im rechten oberen und linken unteren die Abweichung des primären Meridianes von der zur Blickebene verticalen Lage entgegengesetzt derjenigen ist, welche im linken oberen und rechten unteren Viertel eintritt.

Seitenwendung der Gesichtslinie.	Erhebung der Blickebene							
	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
5°	0°13′	0°26′	0°40′	0°53′	1°7′	1°20′	1°35′	1°49′
10°	0°26′	0°53′	1°19′	1°46′	2°13′	2°41′	3°10′	3°39′
15°	0°40′	1°19′	1°59′	2°40′	3°21′	4°2′	4°45′	5°29′
20°	0°53′	1°46′	2°40′	3°34′	4°29′	5°25′	6°22′	7°21′
25°	1°7′	2°13′	3°21′	4°29′	5°38′	6°48′	8°0′	9°14′
30°	1°21′	2°41′	4°2′	5°25′	6°48′	8°13′	9°39′	11°8′
35°	1°35′	3°10′	4°45′	6°22′	8°0′	9°39′	11°21′	13°6′
40°	1°49′	3°39′	5°29′	7°21′	9°14′	11°8′	13°6′	15°5′

Eine praktische Bedeutung würde die Kenntniss dieser von Helmholtz als Raddrehungswinkel bezeichneten Winkel insbesondere dann haben, wenn man nach der Substitutionsmethode Untersuchungen mit Hülfe eines zu den Gesichtslinien verticalen Gesichtsfeldes anstellt. In Betreff der Bedeutung, welche der Bewegung der Augen nach dem Listing'schen Gesetze für die räumliche Wahrnehmung, insbesondere während der Bewegung zukommt, sind diese Winkel ohne Interesse. Hier kommt es auf das an, was wir mit Hering die Rollung des Auges genannt haben.

Wir sind überhaupt im Obigen der Darstellung Hering's [1] gefolgt, weil

1 Hering, Die Lehre vom binocularen Sehen 1868.

die von Helmholtz gegebene Darstellung des Listing'schen Gesetzes eine Verwirrung insofern angerichtet hat, als vielfach der „Raddrehungswinkel" (Helmholtz) verwechselt wurde mit dem Winkel der um die Gesichtslinie erfolgten Rollung, d. h. in der Terminologie der Mechanik, der auf die Gesichtslinie projicirten Drehung oder der in die Gesichtslinie fallenden Componente der Drehung. Diese Verwechslung lag für einen Leser, der das Listing'sche Gesetz noch nicht durchdacht hatte, um so näher, als Helmholtz [1] in seiner ersten Abhandlung sagte, er wolle „für die Drehung um die Gesichtslinie den bezeichnenden Namen der Raddrehung beibehalten, da sich die Iris dabei wie ein Rad um ihren Mittelpunkt dreht"; und zwei Seiten weiter: „Die Raddrehung des Auges wollen wir nun messen durch den Winkel, den der Netzhauthorizont" (d. i. der mittle Querschnitt) „mit der Visirebene bildet." Ganz dieselben Definitionen wiederholen sich bei der zweiten Darstellung [2], welche Helmholtz von den Gesetzen der Augenbewegung gegeben hat. So oft sich aber die Gesichtslinie in einer primären Bahnebene bewegt, die nicht vertical oder horizontal ist, ergeben sich dann „Raddrehungswinkel", ohne dass doch eine Rollung um die Gesichtslinie stattfindet.

Donders [3] und Hermann [4] haben Apparate zur Veranschaulichung des Listing'schen Gesetzes der Augenbewegungen angegeben.

Augenbewegung mit begleitender Kopfbewegung. Durch die willkürlichen Blickbewegungen werden die Netzhautbilder der ruhenden Aussendinge auf der Netzhaut verschoben. Die Bahn, welche ein bestimmtes Bild bei dieser Verschiebung auf der Netzhaut beschreibt, hängt ab von der Art der Bewegung des Auges und muss bei einer und derselben Ortsänderung der Gesichtslinie verschieden sein, je nachdem die Gesichtslinie mit oder ohne Rollung bewegt wird. So lange der Kopf, wie dies bei den obigen Versuchen der Fall war, feststeht, können wir bei jeder bestimmten Bewegung aus dem Listing'schen Gesetze für jeden beliebigen Aussenpunkt die Bahn seiner Bewegung auf der Netzhaut ableiten. Dies ist aber nicht mehr der Fall, wenn wir, wie dies beim gewöhnlichen Sehen meist der Fall ist, die Ortsveränderung des Blickpunktes nicht bloss durch Augenbewegung, sondern zugleich auch durch Kopfbewegungen bewirken. Denn diesenfalls hängt die Bahn eines Bildpunktes auf der Netzhaut nicht bloss von der Art der Drehung des Auges, sondern auch mit von derjenigen der begleitenden Kopfbewegung ab.

Helmholtz [5] giebt an, dass „die gewöhnlichen Bewegungen des Kopfes nach demselben Principe geschehen, wie die der Augen,

1 Helmholtz, Arch. f. Ophthalmologie IX. (2) S. 154. 1863.
2 Derselbe, Physiol. Optik S. 462.
3 Donders, Arch. f. Ophthalmologie XVI. (1) S. 154. 1870.
4 Hermann, Arch. f. d. ges. Physiol. VIII. S. 305. 1874.
5 Helmholtz, Physiol. Optik S. 486.

wenn auch mit grösserer Freiheit veränderlich als die des Auges", d. h. mit andern Worten, dass der Kopf sich aus seiner Primärstellung heraus um eine Axe dreht, welche der Axe der gleichzeitigen Augendrehung annähernd parallel ist. Hiernach müsste, wenn wir den oben beschriebenen Nachbildversuch so wiederholen, dass dabei der Kopf sich zwanglos mitbewegen kann, im Uebrigen aber die Versuchsbedingungen die gleichen sind, auch das Nachbild bei den verschiedenen Bewegungen des Blickes auf der verticalen Wand sich annähernd ebenso verhalten, wie bei fester Kopfhaltung. HERING[1] hat jedoch darauf aufmerksam gemacht, dass zwischen dem Blicken mit fixirtem und dem mit frei beweglichem Kopfe insofern ein wesentlicher Unterschied besteht, als die Art der associirten Drehung des Kopfes die Rollung der Augen gerade bei den für die räumliche Wahrnehmung wichtigsten Bewegungen compensiren kann. Man findet nämlich bei Wiederholung des Nachbildversuches mit frei beweglichem Kopfe, wenn man mit dem Nachbilde eines bei Primärstellung fixirten verticalen Streifens im Auge den Blick auf einer der seitwärts gelegenen verticalen Schnüre auf- und absteigen lässt, dass das Nachbild diese Verticalen immer nahezu deckt. Dabei wendet man den Kopf, wie oben S. 438 schon erörtert wurde, seitwärts. Würde man ihn soweit wenden, dass die eben betrachtete Verticalschnur in seine Medianebene zu liegen käme, so wäre das Ergebniss des Versuches selbstverständlich. So aber folgt daraus, dass die zu erwartende Rollung des Auges durch die Art der Kopfbewegung nahezu compensirt werde. Wiederholt man den Versuch mit einem horizontalen Nachbilde und lässt den Blick an den höher oder tiefer gelegenen horizontalen Schnüren hingleiten, so sind die Neigungen des Nachbildes zur Horizontalen nur um weniges kleiner, als wenn man den Versuch mit festgehaltenem Kopfe anstellt. Es folgt hieraus, dass der Kopf sich nicht nach demselben Principe bewegt, wie die Augen, was, wie wir weiter sehen werden, nicht ohne wesentliche Bedeutung für die räumliche Wahrnehmung ist.

RITZMANN hat mit Hülfe des oben (S. 440) beschriebenen Visirzeichens auch die Lage der Axen zu bestimmen versucht, um welche die associirten Kopfbewegungen erfolgen. Er giebt an, „dass für Blickbewegungen in horizontaler und verticaler Bahn die Kopfbewegung um eine verticale, beziehungsweise horizontale Axe stattfindet." Individuell verschieden fand er „die Richtung der Kopfbewegung für Blickexcursionen in schiefer Richtung." „Es kommen, wie er sagt, hierbei Abweichungen der Kopfbewegung von dem, dem LISTING'schen Gesetze analogen Ver-

1 HERING, Die Lehre vom binocularen Sehen S. 106. 1868.

halten vor."[1] Ein bestimmtes Gesetz dafür hat er nicht angegeben. „Die Frage, ob der Kopf bei Betrachtung desselben Punktes dieselbe Stellung habe, unabhängig von dem Wege, auf dem er zu dessen Betrachtung gelangt, muss, sagt Ritzmann[2], in strengem Sinne genommen, negativ beantwortet werden." Doch fand er „eine Andeutung eines solchen Verhaltens."

III. Die Augenbewegungen beim Nahsehen.

Wenn das Gesetz Listing's mit der von ihm angenommenen und von Helmholtz experimentell nachgewiesenen Primärstellung auch beim Nahsehen giltig wäre, so würde sich aus demselben auch für jede Convergenzstellung oder, wie wir sie nennen wollen, Nahstellung der Gesichtslinien die Lage des Auges und seiner Mittelschnitte ableiten lassen. Es würde sich dabei ergeben, dass die in der Primärstellung horizontalen Meridiane bei jeder Convergenz innerhalb der primären Blickebene dieselbe nicht verlassen, dass sie dagegen bei jeder symmetrischen Nahstellung in gehobener Blickebene mit ihrem äusseren Ende unterhalb der Blickebene liegen, wobei sie nach oben convergiren würden. Umgekehrt müssten nach jenem Gesetze die in der Primärstellung horizontalen Meridiane nach unten convergiren, sobald die Gesichtslinien bei gesenkter Blickebene symmetrisch convergiren. Die Abweichungen der mittlen Querschnitte von der Blickebene müssten um so stärker sein, je stärker die Hebung oder Senkung der Blickebene und je stärker die Convergenz wäre.

Aber schon ehe Helmholtz die Giltigkeit des Listing'schen Gesetzes für die Fernstellungen des Blickes und das Fernsehen erwiesen hatte, war insbesondere von Meissner[3] und v. Recklinghausen[4] gezeigt worden, dass die Augen bei symmetrischer Convergenz der Gesichtslinien ganz andere Stellungen haben, als nach Listing's Gesetz zu erwarten war. Später machte Volkmann[5] vereinzelte hierher gehörige Beobachtungen. Er fand, dass „bei Convergenz auf einen 30 cm. entfernten Punkt in der Horizontalebene der Divergenzwinkel der mittlen Längsschnitte von $2^0,15$ bis auf $4^0,16$ stieg, so dass ihre Abweichung von der verticalen Lage um etwa 1^0 wuchs; bei stärkerer Convergenz auf 20 cm. Abstand nahm

1 Arch. f. Ophthalmologie XXI. (1) S. 131—143. 1875.
2 Ebenda S. 146.
3 Meissner, Beiträge zur Physiologie des Sehorgans. Leipzig 1854.
4 v. Recklinghausen, Arch. f. Ophthalmologie V. (2) S. 173. 1859.
5 Mitgetheilt von Helmholtz, Physiol. Optik S. 523.

diese Abweichung um weitere 0°,37 zu. Wenn VOLKMANN einen verticalen farbigen Streifen bei Parallelstellung fixirte und dann, ohne die Gesichtslinie des einen Auges zu verrücken, die andere auf einen in der ersten Gesichtslinie gelegenen nahen Punkt einstellte, so erschien das Nachbild nun gegen den Streifen verdreht, Beweis, dass das Auge in demselben Sinne um die feststehende Gesichtslinie gerollt worden war, und dass also bei derselben Stellung einer Gesichtslinie relativ zum Kopfe das Auge verschiedene Lagen in der Orbita hat, je nachdem die zweite Gesichtslinie parallel oder convergent zur ersten ist.

HELMHOLTZ [1] fand analoge, doch viel schwächere Abweichungen. DONDERS [2] solche bis zu 3°. HERING [3] untersuchte dann nach der Substitutionsmethode die Augenstellungen bei verschiedenen Lagen der Blickebene, verschiedenen Graden der Convergenz und sowohl bei symmetrischer als bei unsymmetrischer Convergenz der Gesichtslinien, und kam zu dem allgemeinen Ergebniss [4], dass (von den Hebungen der Blickebene abgesehen) „die mittlen Längsschnitte bei symmetrischen Convergenzstellungen mit dem obern Ende weiter nach aussen, beziehentlich weniger nach innen geneigt sind, als das LISTING'sche Gesetz fordert, und dass diese Abweichung einerseits mit der Zunahme des Convergenzwinkels, andererseits mit der Senkung der Blickebene und äussersten Falls beinahe auf 5° wächst"; dass ferner bei unsymmetrischer Convergenz die relative Lage beider Netzhäute zu einander und somit die Divergenz der mittlen Längs- oder Querschnitte sich nicht sehr erheblich anders zeigt, als bei gleich starker symmetrischer Convergenz.

DONDERS [5] fand später bei 17 Personen Zunahme der Divergenz der mittlen Längsschnitte bei Convergenz in der primären Blickebene bis zu 5°. Analoge Ergebnisse erhielt LE CONTE. [6] LANDOLT [7] machte eine grosse Reihe von Versuchen bei symmetrischer Convergenz und verschiedener Neigung der Bickebene nach ähnlicher Methode und mit analogem Ergebniss wie HERING. Nur DOBROWOLSKY [8] erhielt ganz abweichende

1 HELMHOLTZ, Physiol. Optik S. 469.
2 J. B. SCHUURMANN vergelijkend Onderzoek. van het og. Utrecht 1863 (citirt nach HELMHOLTZ, Physiol. Optik S. 524).
3 HERING, Die Lehre vom binocularen Sehen 1868.
4 l. c. S. 96.
5 DONDERS, Arch. f. d. ges. Physiol. XIII. S. 419. 1876.
6 LE CONTE, American Journal of science and arts. XLVII. 2. p. 153 (citirt nach NAGEL's Jahresber. f. Ophthalmologie 1872).
7 LANDOLT, Handb. d. ges. Augenheilk. II. (2) S. 660. 1876.
8 DOBROWOLSKY, Arch. f. Ophthalmologie XVIII. (1) S. 53. 1872.

Resultate; doch fehlen bei ihm Angaben über die unerlässlichen Controlvorrichtungen.

Meissner fand, dass seine Augen, wenn sie in einer um 45° gegen den Horizont geneigten Blickebene aus der Parallelstellung bis auf 40° convergirten, keine Rollung erlitten, Recklinghausen dasselbe für eine Neigung der Blickebene von 35° und Convergenz bis auf 50°. Beide kannten die Primärstellung noch nicht, und es fragt sich also, inwieweit die von ihnen zum Ausgang gewählte Blickebene (von 0° Neigung) der primären Blickebene nahe kam. Für Meissner standen bei Neigung der Blickebene um 45° die mittlen Längsschnitte vertical, für Recklinghausen lagen bei Neigung der Blickebene um 35° die mittlen Querschnitte in der Blickebene.

Hering konnte keine Lage der Blickebene finden, bei der starke Convergenz ohne alle Rollung verlaufen wäre, doch war sie bei Neigung der Blickebene um 25° am geringsten. Donders [1] theilte mit, dass für fünf verschiedene Beobachter bei einer bestimmten Neigung der Blickebene, die zwischen 20 und 27° lag, die queren Mittelschnitte bei allen symmetrischen Convergenzgraden in der Blickebene blieben; bei einem sechsten Beobachter variirte diese Neigung zwischen 20 und 30°.

Ueber die Stellung der Augen bei gehobener Blickebene und Convergenz vergleiche die erwähnten Untersuchungen von Meissner, Recklinghausen, Hering und Landolt. —

Meissner fixirte einen in der Medianebene gelegenen Punkt und beobachtete dabei die Doppelbilder einer hinter dem Blickpunkte in der Medianebene gelegenen Geraden. Diese Doppelbilder erscheinen im Allgemeinen nicht parallel, sondern man muss, wenn dies der Fall sein soll, die Gerade in eine zur Längshoropterfläche nahezu parallele Lage bringen und kann nun aus der Lage der Geraden die Lage der mittlen Längsschnitte berechnen. Diese Methode und die Art der Berechnung hatte zwar, wie Hering [2] zeigte, einige nicht unwesentliche Fehlerquellen, indessen konnte man doch schon aus Meissner's Angaben erhebliche Abweichungen von Listing's Gesetz erkennen.

v. Recklinghausen untersuchte nach der Substitutionsmethode und zwar mit einer in der Blickebene parallel der Frontalebene gelegenen Linie, welche sich in ihrem Mittelpunkte derart knicken liess, dass beide Hälften derselben um gleiche Winkel in der zur Medianlinie senkrechten Ebene über die Blickebene erhoben oder unter dieselbe gesenkt werden konnten, während die Spitze des so gebildeten Winkels immer im Blickpunkte liegen blieb. In die Medianebene brachte er einen bis an den Mittelpunkt der Linie reichenden Schirm, so dass jedes Auge nur die eine Hälfte der Linie sah, wenn der Mittelpunkt derselben binocular fixirt wurde. Aus dem Winkel, um welchen beide Linienhälften gehoben oder gesenkt werden mussten, damit die Linie nicht mehr geknickt sondern gerade erschien, liess sich der Winkel berechnen, um welchen die mittlen Querschnitte von der Blickebene abwichen.

Hering benutzte die oben (S. 482) beschriebene Vorrichtung. Die

1 Donders, Arch. f. d. ges. Physiol. XIII. S. 419. 1876.
2 Hering, Beiträge zur Physiologie III. § 88.

beiden Messingstreifen, welche die Beobachtungslinie trugen, wurden einander soweit genähert, dass sie nur noch um die halbe Distanz der beiden Drehpunkte der Augen von einander abstanden. Stellte er nun die linke Gesichtslinie auf den Drehpunkt des rechten, die rechte auf den des linken Messingstreifens ein, so konnte er wieder ganz analog verfahren, wie bei den Parallelstellungen. Senkrecht unter dem Drehpunkte jedes Streifens trug die Tafel am unteren Rande je eine Marke; diese Marken wurden in der beschriebenen Weise auf die radienartigen Linien des Tisches eingestellt, welche die Seitenabweichung der Gesichtslinie nach Graden angaben. Wenn also z. B. die linke Marke gerade auf den mit $+20^0$ bezeichneten Radius des rechts gelegenen Radiensystems zu liegen kam, die rechte Marke auf den mit $+20^0$ bezeichneten Radius des linken Radiensystemes (Fig. 44 S. 483), so convergirten die Gesichtslinien um 40^0, falls die linke auf den Drehpunkt des rechten, die rechte auf den Drehpunkt des linken Messingstreifens eingestellt war. Uebrigens stand es frei, die beiden Messingstreifen einander noch mehr zu nähern, oder auch bei schwächeren Convergenzgraden die linke Gesichtslinie auf den linken, die rechte auf den rechten Streifen einzustellen. Bei den stärksten Convergenzgraden wurde den beiden Messingstreifen wieder die ursprüngliche Distanz der Augendrehpunkte gegeben.

Le Conte bediente sich der auf S. 369 abgebildeten Gitter, welche er so gegeneinander drehte, bis sie, haploskopisch vereinigt, parallel schienen oder sich deckten.

Donders[1] untersuchte auf verschiedene Weise. Einmal bediente er sich einer schon S. 358, Anm. 2 erwähnten Methode. Sein Apparat, den er Isoskop nennt, besteht aus „1) einem rechtwinkligen festen Rahmen A, B, C, D (Fig. 49), welcher an der oberen Seite eine unbewegliche Scale S von beinahe 60^0 trägt; 2) einem beweglichen Rahmen, dessen Leisten a, b, c, d durch Schrauben 1, 2, 3, 4 beweglich verbunden sind, so dass er Rautenform annehmen kann, wobei die horizontalen Leisten a, b horizontal bleiben, die verticalen c, d unter vollkommen gleichen Winkeln seitlich geneigt sind: diese letzten sind genau in ihrer Mitte gleichfalls durch Schrauben 5, 6 mit den correspondirenden Punkten des festen Rahmens beweglich verbunden. Eine der verticalen Leisten d des beweglichen Rahmens trägt eine Scale mit Nonius n, beweglich über der festen Scale und genau die Neigung

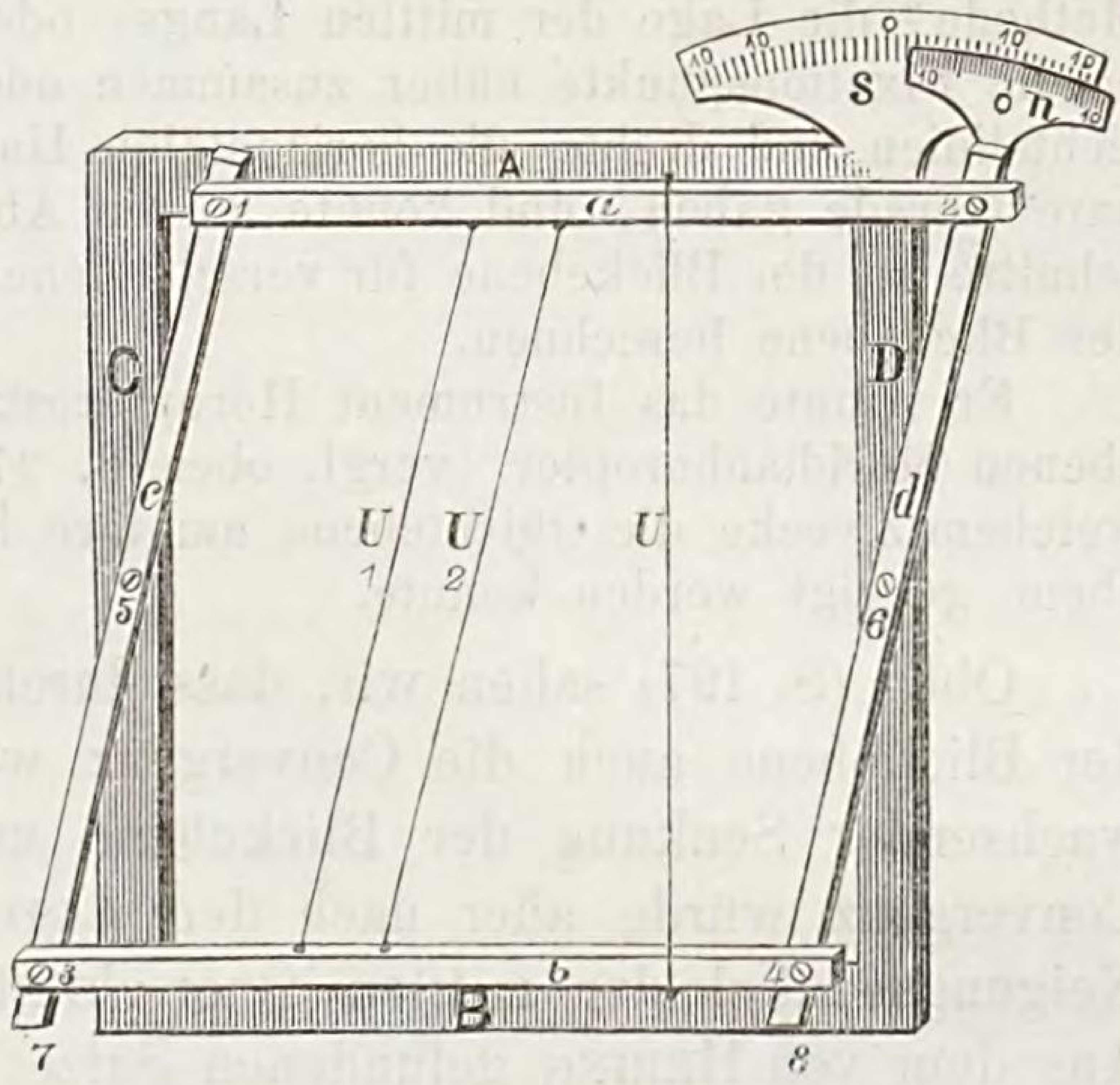


Fig. 49.

1 Donders, Arch. f. Ophthalmologie XXI. (3) S. 107. 1875.

der Leisten anzeigend, was in Zehnteln von Graden abgelesen, in Hundertsteln geschätzt werden kann. Gleiche Neigung erhalten die ursprünglich verticalen Fäden U^1, U^2, während der im Rahmen ausgespannte Faden U seine verticale Richtung unveränderlich behält. Ist dieser von U^1 etwas weiter entfernt als die Knotenpunkte des rechten und linken Auges, dann sieht man, bei parallelen Blicklinien, die Halbbilder von U und U^1 nahe bei einander und kann sie durch Drehen des Rahmens mit der Hand an einem der unteren Enden 7 oder 8 der Leisten c oder d scheinbar parallel stellen.“ Giebt man den Fäden U und U^1 (oder U^2) von vornherein einen kleineren gegenseitigen Abstand, so kann man bei beliebiger Convergenz der Gesichtslinien untersuchen.

Vor diesem Apparate wurde ein Kopfhalter nach Analogie des oben beschriebenen aufgestellt.

Bei einem anderen Versuche benutzte Donders[1] wieder den Kopfhalter und eine Objectebene, welche mittels zweier Arme an den Säulen des Kopfhalters so fixirt war, dass man sie um die durch die beiden Drehpunkte der Augen gelegte Linie (die Grundlinie) drehen konnte. Zugleich konnte dieselbe dem Gesichte näher oder ferner gestellt werden. Die Objectebene blieb, wenn jede Gesichtslinie auf den Fixationspunkt ihrer Seite gerichtet war, immer senkrecht zur Blickebene. Donders bestimmte nun bei horizontaler Blickebene mittels Halblinien nach Hering's Methode[2] die Lage der mittlen Längs- oder Querschnitte. Dann schob er die Fixationspunkte näher zusammen oder fixirte mit gekreuzten Gesichtslinien und drehte die horizontalen Halblinien, bis sie eine scheinbare Gerade gaben, und konnte so die Abweichung der queren Mittelschnitte an der Blickebene für verschiedene Convergenzen und Neigungen der Blickebene berechnen.

Er nannte das Instrument Horopteroskop, weil er damit auch den ebenen Meridianhoropter (vergl. oben S. 379) demonstriren konnte, zu welchem Zwecke die Objectebene um ihre horizontale Queraxe zur Blickebene geneigt werden konnte.

Oben (S. 497) sahen wir, dass durchschnittlich mit der Senkung der Blickebene auch die Convergenz wächst und umgekehrt. Mit wachsender Senkung der Blickebene und gleichzeitig wachsender Convergenz würde aber nach dem Listing'schen Gesetze auch der Neigungswinkel der mittlen Querschnitte zur Blickebene wachsen. Aus dem von Hering gefundenen Satze über die Abweichungen von diesem Gesetze bei Convergenzstellungen ergiebt sich aber, dass die nach Listing's Gesetz zu erwartenden Neigungen der mittlen Querschnitte zur Blickebene, wobei die Ebenen ihrer Richtungslinien einen nach oben offenen Winkel bilden würden, dadurch compensirt wird, dass die wirkliche Lage der Querschnitte im entgegengesetzten Sinne von der erwarteten abweicht.

1 Donders, Arch. f. d. ges. Physiol. XIII. S. 395. 1876.
2 Siehe oben Cap. I.

Es fragt sich nun, ob diese Compensirung eine derartige ist, dass dadurch der Parallelismus der queren Mittelschnitte für diejenigen Convergenzen resultirt, welche bei Betrachtung eines nahen, angenähert oder wirklich horizontalen Objectfeldes benutzt werden. Ein einfacher Versuch lehrt, dass dies im engeren Blickfelde der Fall ist. Man lege vor sich auf den Tisch ein grosses Blatt Papier, auf welchem eine gerade Linie gezogen ist, die, wenn man gerade vor dem Papier sitzt, in die Medianebene des Kopfes zu liegen kommt. Ferner bringe man zwischen Kopf und Papier in die Medianebene eine Pappe, welche nicht ganz bis auf das Papier reicht, so dass jedes Auge die Linie auf demselben eben noch sehen kann, wenn man den Blick auf derselben hinwandern lässt. Fixirt man jetzt bei ganz zwangloser, gewohnheitsgemässer Kopfhaltung einen Punkt der medianen Linie und schiebt von der Seite her eine lange Stricknadel genau in querer Richtung über den Fixationspunkt weg, so dass die Nadel halb links halb rechts zu liegen kommt, so erscheint sie als eine Gerade, obwohl man ihre linke Hälfte nur mit dem linken, ihre rechte nur mit dem rechten Auge sieht.

Dies beweist, dass die mittlen Querschnitte der Netzhäute in der Blickebene liegen, denn andernfalls würden die beiden Halbbilder der Nadel einen Winkel mit einander machen. Schiebt man jetzt, ohne den Kopf zu verrücken, die Nadel vom Gesichte weg oder nach demselben hin, ohne ihre quere Richtung zu ändern, und folgt mit dem Blicke entlang der medianen Linie, so erscheint die Nadel noch eine ziemliche Strecke gerade, dann aber erhält sie eine schwache Knickung derart, dass bei zu grosser Entfernung der Nadel die Oeffnung des stumpfen Winkels der Knickung vom Gesichte weg, bei zu grosser Näherung ihm zugewendet ist. Führt man aber die letztbeschriebene Blickbewegung zwanglos aus, welchen Falls dann der Kopf sich etwas daran betheiligt, so bleibt die Knickung der Nadel auch bei etwas stärkeren Excursionen des Blickes längs der medianen Linie aus. Schiebt man ferner das Blatt mit der Linie seitwärts, so dass letztere parallel der Medianebene bleibt und dreht auch den Schirm mit seinem unteren Rande entsprechend zur Seite, so kann man den Versuch innerhalb ziemlich weiter Grenzen mit analogem Erfolge bei unsymmetrischen Convergenzstellungen wiederholen, woraus sich ergiebt, dass auch hierbei immer correspondirende Meridiane, wenn auch nicht die mittlen Querschnitte, in der Blickebene liegen.

Die mediane Linie der Tafel ist bei dem eben beschriebenen Versuche mit der Nadel nicht in der Lage, sich correspondirend ab-

zubilden, falls die Tafel nicht mit dem ferneren Ende gehoben ist, so dass sie den Längshoropter tangirt und nahezu mit dem Meridianhoropter zusammenfällt. Man braucht nur vor das eine Auge von unten, vor das andere von oben her in etwa 10 cm. Entfernung einen kleinen Schirm zu halten, der dem einen Auge die obere, dem andern die untere Hälfte der Geraden auf der horizontalen Tafel verdeckt, und man wird eine scheinbare Knickung derselben sehen, weil die fernere Hälfte der Geraden jenseits, die nähere diesseits der Längshoropterfläche gelegen ist, und die Gerade sich daher nicht auf dem mittlen Längsschnitte abbilden kann.

Man kann sich den oben erwähnten Satz von den Abweichungen vom Listing'schen Gesetz beim Nahsehen auch so veranschaulichen, dass man die Augen zunächst auch bei den Convergenzstellungen nach dem Listing'schen Gesetze gestellt denkt und sich weiter vorstellt, beide Augen erführen nun eine Rollung um die Gesichtslinie derart, dass die mittlen Querschnitte sich mit ihrer schläfenwärts liegenden Hälfte solange gleichviel senken, bis sie parallel liegen, was bei symmetrischer Convergenz zugleich bedeutet, dass sie in die Blickebene zu liegen kommen; und zwar müsste diese symmetrische Rollung um so stärker sein, je stärker die Convergenz und je mehr die Blickebene gesenkt ist. Daraus folgt zugleich, dass auch bei unsymmetrischer Convergenz die beiden mittlen Querschnitte parallel zur Blickebene geneigt sind und zwar so, dass sie, wenn der Blickpunkt rechts von der Medianebene liegt, mit ihrer rechten Hälfte, wenn er links liegt, mit ihrer linken Hälfte unter der Blickebene sind. Es gilt dies Alles jedoch genauer nur für das engere Blickfeld.

Um sich dies Verhalten durch den directen Versuch zu veranschaulichen, überziehe man eine ebene Tafel, z. B. eine Glasscheibe von mässiger Grösse mit weissem Papier, welches mit einem quadratischen Gitter von schwarzen Parallellinien derart bedeckt ist, dass zwei der Linien sich im Mittelpunkte der Tafel rechtwinklig kreuzen. Diese Tafel lege man vor sich auf den Tisch, so dass ihr Mittelpunkt in der Medianebene des Kopfes und in mittler Blickweite liegt und die Linien parallel der Medianebene und der Frontalebene laufen. Durch die Mitte der Tafel lege man in querer Richtung einen halb blauen, halb gelben Streifen, so dass die Grenzlinie der beiden Farben den queren Linien der Tafel parallel ist. Den markirten Mittelpunkt dieser Linie fixire man anhaltend und lasse dann mit dem Nachbild im Auge den Blick ohne begleitende Kopfbewegung nach rechts oder links wandern. Dabei dreht sich das Nachbild der Grenzlinie stets positiv (wie ein Uhrzeiger), wenn der Blickpunkt aus der Median-

ebene in die rechte, negativ, wenn er in die linke Hälfte des engeren Blickfeldes übergeht, um so stärker, je mehr die Blickebene gesenkt wird. Da, wie oben gezeigt wurde, die queren Mittelschnitte bei diesen Blickbewegungen immer nahezu parallel bleiben, so kann man mit binocularem Nachbilde experimentiren. Zur Controle kann man aber auch das Nachbild nur in einem Auge erzeugen und dann das andere Auge wieder öffnen. Doch ist dabei zu bedenken, dass während der Erzeugung des einäugigen Nachbildes beide Augen auf den Mittelpunkt der Tafel gerichtet sein sollen.

Dieser Versuch zeigt zugleich, dass es keinen Punkt auf der Mittellinie der Tafel giebt, der mit dem primären Blickpunkt beim Fernsehen insofern verglichen werden könnte, als von ihm aus der Blick in jeder geraden Richtung auf dem ebenen Blickfelde wandern könnte, ohne dass die Augen eine Rollung erführen.

Es handelt sich also nicht etwa um irgend welche neue, für das Nahsehen bestimmte Primärstellung. Auch wenn man die Tafel so zur Blickebene neigt, dass ihre mediane Linie mit der Geraden des Längshoropters und sie selbst mit dem Meridianhoropter zusammenfällt, und also die günstigste Lage dafür gegeben ist, dass sich auf der Tafel angebrachte Figuren möglichst correspondirend abbilden, ändert sich an dem Ergebnisse des Versuchs nichts Wesentliches. Ob bei dieser Lage des ebenen Blickfeldes der Parallelismus der queren Mittelschnitte in etwas weiteren Grenzen erhalten bleibt, was theoretisch viel für sich hat, wäre noch zu untersuchen.

Endlich sei erwähnt, dass auch dann keine mechanische Analogie mit dem Listing'schen Gesetze gefunden wird, wenn man das Blickfeld rechtwinklig zur Blickebene anbringt, eine Lage desselben, welche wir beim Nahsehen vermeiden; denn entweder liegen die aus der Nähe betrachteten Dinge auf dem Tische, und dann neigen wir den Kopf, jedoch nicht soweit, dass die Ebene des Tisches senkrecht zur Blickebene liegt, oder wir halten die Dinge, z. B. ein Bild, in der Hand, dann neigen wir den Kopf weniger und halten das Bild so, dass es nahezu in den Längshoropter zu liegen kommt.

Dagegen besteht zwischen dem Listing'schen Gesetze der Augenbewegung für das Fernsehen und dem oben mitgetheilten Gesetze für das Nahsehen allerdings eine grosse optische Analogie: beide erfüllen das Princip des grössten Horopters, wie es Meissner gefordert hat, d. h. sie erfolgen beim gewöhnlichen Sehen so, dass die grösstmögliche Correspondenz der Netzhautbilder erreicht wird.

Im Interesse dieser Correspondenz werden unter besonderen Umständen auch Bewegungen und Stellungen der Augen herbeigeführt,

zu welchen beim gewöhnlichen Sehen gar keine oder nur geringe Veranlassung gegeben ist. Man kann diese Bewegungen bezeichnen als

IV. Aussergewöhnliche Augenbewegungen im Interesse des Einfachsehens.

Wenn man correspondirend liegende identische Druckschriften oder Zeichnungen mit parallelgerichteten Gesichtslinien haploskopisch zur Deckung gebracht hat und dann die eine innerhalb ihrer Ebene ein wenig um den Fixationspunkt dreht, so führen, wie Nagel [1] gefunden hat, die Augen eine kleine Rollung um ihre Gesichtslinie aus, durch welche die Bilder der beiden Zeichnungen wieder die möglichst correspondirende Lage auf den Netzhäuten erhalten. Hierzu würde an sich genügen, dass nur das eine Auge eine Rollung um denselben Winkel ausführt, um welchen die ihm gegenüberliegende Zeichnung gedreht wurde. In Wirklichkeit aber werden statt dessen beide Augen in symmetrischer Weise um denselben Winkel gerollt; höchstens ist, wie Nagel [2] meint, die Rollung desjenigen Auges, dessen Netzhautbild verdreht wurde, etwas stärker als die des andern. Dieselben Rollungen zeigen die Augen, wenn man die Correspondenz der Netzhautbilder dadurch aufhebt, dass man beide Zeichnungen in entgegengesetzter Richtung ein wenig um den Fixationspunkt dreht. Um auf diese Weise ziemlich starke Rollungen der Augen herbeizuführen, muss man die Drehung der Zeichnungen sehr langsam ausführen oder mit Unterbrechungen allmählich verstärken, weil sonst die Rollung hinter der Drehung zurückbleibt und das haploskopische Bild in Doppelbilder zerfällt. Immer sind selbst die stärksten hierbei erreichten Rollungen klein und überschreiten nach Nagel's Angabe nicht 5^0 für jedes Auge, was einer gegenseitigen Verdrehung der Bilder um 10^0 entspricht.

Diese Rollungen im Interesse der Herstellung möglichster Correspondenz der Netzhautbilder treten jedoch kaum ein, wenn die Bilder ausschliesslich oder auch nur vorwiegend verticale oder stark zur Horizontalen geneigte Conturen enthalten. Denn solche geben im Wesentlichen querdisparate Netzhautbilder, welche durch kleine Aenderungen des Convergenzwinkels Punkt für Punkt leicht zur Deckung gebracht werden können, soweit sie nicht schon mit disparaten Stellen einfach gesehen werden.

Enthalten aber die Zeichnungen vorwiegend horizontale Punkt-

1 Nagel, Das Sehen mit zwei Augen S. 51. 1861.
2 Derselbe, Arch. f. Ophthalmologie XIV. (2) S. 235. 1868.

reihen und Conturen, so geben diese bei der Verdrehung längsdisparate Netzhautbilder, es entstehen Doppelbilder, die sich durch Convergenzänderungen nicht Punkt für Punkt beseitigen lassen, und diese Doppelbilder erzeugen jenes unbehagliche Gefühl, welches Jeder beim Sehen im Stereoskope erfährt, wenn die Verschmelzung der beiden Bilder nicht gelingt. Diese Doppelbilder und das durch sie bedingte Unbehagen können hier nur durch Rollungen der Augen beseitigt werden.

Bietet man den Augen von vornherein zwei etwas gegeneinander verdrehte gleiche Bilder zur haploskopischen Vereinigung, so bleibt letztere trotz zahlreichen horizontalen Conturen aus, wenn die gegenseitige Verdrehung der Bilder wenige Grade übersteigt. Man muss dann zum Zwecke der Verschmelzung erst die Bilder wieder in eine nahezu correspondirende Lage zurückbringen und nach erfolgter Verschmelzung langsam weiter drehen, wie oben beschrieben wurde.

Helmholtz [1] fand unabhängig von Nagel und nach einer andern Methode Rollungen der Augen bis zum Betrage von 7° für beide Augen zusammen. Wenn man zwei rechtwinklige Prismen hintereinander so vor ein Auge hält, dass ihre Hypotenusenflächen parallel, aber nach entgegengesetzten Seiten, und je zwei Kathetenflächen ebenfalls parallel und die Kanten rechtwinklig zur Richtung der Gesichtslinie liegen, so erscheinen alle Objecte in unveränderter Lage (abgesehen von einer kleinen scheinbaren Näherung oder Vergrösserung). Die Dinge werden nämlich erst von der Hypotenusenfläche des vom Auge entfernteren, dann von der des näheren Prismas gespiegelt und erfahren also eine zweimalige Umkehrung ihres Bildes. Man kann dabei die Prismen so gegeneinanderstellen, dass der Strahl, welcher vor dem Eintritt ins entferntere Prisma mit der Gesichtslinie zusammenfällt, dasselbe auch nach seinem Austritt aus dem näheren Prisma thut.

Dreht man nun das eine Prisma um diesen Strahl als Axe, so erleiden die Dinge eine Scheindrehung um den fixirten Punkt, sodass also auch ihr Netzhautbild in ganz analoger Weise verdreht wird, wie bei den oben beschriebenen Versuchen.

Legt man die Prismen mit zwei Kathetenflächen aneinander und dreht dann das eine um die zu diesen Flächen senkrechte Axe, so tritt, wie Hering [2] gegen Helmholtz's erste Beschreibung des Versuchs einwandte, eine Scheinverschiebung der Objecte nach oben oder unten und seitwärts

1 Helmholtz, Verh. d. naturhist.-med. Ver. z. Heidelberg 1865. S. 258 und Physiol. Optik S. 476.
2 Hering, Die Lehre vom binocularen Sehen S. 61.

hinzu, wodurch der Versuch unrein wird, weil die Augen im Interesse der Correspondenz der Bilder zu complicirteren Bewegungen gezwungen werden.

Hering (l. c.) konnte anfangs weder mit Hülfe von Doppelzeichnungen noch nach der Methode von Helmholtz Rollungen seiner Augen herbeiführen, weil er Objecte und Zeichnungen benutzte, welche wenig oder gar keine horizontale Conturen enthielten, und weil grosse Uebung im Doppelsehen disparater Bilder ein wesentliches Hinderniss für das Gelingen der Versuche bildet. Später hat er mit Hülfe horizontaler Conturen ebenfalls kleine Rollungen erhalten [1] und dieselben als einen weiteren Beweis für seine Ansicht hingestellt, dass die grösstmögliche Correspondenz der Netzhautbilder ein wesentliches Leitmotiv für die Augenbewegungen ist.

Der grossen Langsamkeit, mit welcher die beschriebene Rollung erfolgt, entspricht die weitere Thatsache, dass die einmal erfolgte Rollung eine gewisse Dauerhaftigkeit besitzt. Blickt man z. B., nachdem die Augen sich einige Zeit mit der haploskopischen Betrachtung zweier gegeneinander verdrehter Zeichnungen beschäftigt haben, nach einer entfernten querhorizontalen Linie, so sieht man dieselbe in Doppelbildern, die sich im Blickpunkte unter sehr spitzem Winkel durchschneiden, und erst allmählich gehen die Augen durch Gegenrollung in ihre normale Stellung zurück, so dass querhorizontale Linien sich wieder correspondirend abbilden.

Dieses Verhalten ist von grosser Bedeutung für das gewöhnliche Sehen. Sind nämlich die Augen zu den Aussendingen so gestellt, dass viele Punkte und quere Conturen derselben schräg disparate Netzhautbilder geben, weil die mittlen Querschnitte nicht in der Blickebene liegen, so kann diesem Uebelstande durch kleine Rollungen der Augen abgeholfen werden, welche, einmal eingetreten, fortbestehen und wahrscheinlich habituell werden, wenn die Bedingungen ihres Entstehens fortdauern oder häufig wiederkehren.[2]

Ganz ähnlich wie die beschriebenen Rollungen verhält sich betreffs der Langsamkeit und Schwierigkeit ihres Eintretens und betreffs der Nachdauer eine zweite, schon länger bekannte Art von Bewegungen, welche ebenfalls im Interesse der Correspondenz der Bilder ausgeführt werden. Wenn man nämlich von zwei zunächst correspondirenden Bildern, welche bei Parallelstellung der Gesichtslinien haploskopisch vereinigt wurden, das eine sehr langsam und absatzweise ein wenig nach oben oder unten schiebt, so folgt das entsprechende Auge dieser Verschiebung, so dass nun die Gesichtslinien

1 Hering, Arch. f. Ophthalmologie XV. (1) S. 1. 1869.

2 Derselbe, ebenda S. 7.

nicht mehr in einer Ebene liegen. Solche einseitige Hebungen und Senkungen des Auges hat zuerst DONDERS[1] mit Hülfe eines schwachen Prismas erzielt. Hält man ein solches zunächst mit verticaler Kante vor ein Auge, so dass der brechende Winkel nach innen gerichtet ist, stellt durch Erhöhung der Convergenz das Einfachsehen wieder her und dreht dann das Prisma um die Richtung der Gesichtslinien ganz allmählich in die horizontale Lage, so hebt oder senkt sich ebenfalls das Auge im Interesse des Einfachsehens. HELMHOLTZ[1] konnte auf diese Weise Differenzen in der Hebung oder Senkung beider Gesichtslinien um 6° ohne Schwierigkeit herbeiführen, HERING[2] nach längerer Uebung Prismen von 8° überwinden. Entfernt man das Prisma, so bleibt das Auge relativ zum andern einige Zeit in seiner abnormen Stellung und man sieht anfangs Alles in übereinander liegenden Doppelbildern.

In ganz analoger Weise lassen sich mit Hülfe haploskopisch vereinigter Zeichnungen, deren gegenseitigen Abstand man allmählich vergrössert (H. MEYER[2]), oder durch vertical gestellte Prismen (DONDERS[1]) Divergenzen der Gesichtslinien im Interesse des Einfachsehens herbeiführen, welche von MEYER und HERING bis auf 10° gebracht werden konnten. Hält man nach ROLLET[3] vor die Augen je eine dicke planparallele Glasplatte vertical und so zur Gesichtslinie geneigt, dass ihr medianwärts gelegener Rand dem Gesichte näher ist als der laterale, und blickt durch die Platten nach fernen Objecten, so sieht man dieselben einfach, obwohl hierzu wegen der durch die Platten bedingten Verschiebung der Lichtstrahlen eine Divergenz der Gesichtslinien erforderlich ist. Bringt man bei parallelen Gesichtslinien in jede derselben einen starken verticalen Faden oder Draht in einer Entfernung, welche ein deutliches Sehen derselben gestattet, so werden die Bilder derselben haploskopisch verschmolzen. Erhöht man nun allmählich den gegenseitigen Abstand der Drähte oder neigt ihr oberes Ende nach aussen, so gehen die Gesichtslinien zur Divergenz über und die Verschmelzung bleibt bis zu einer gewissen Grenze erhalten.[4]

V. Rollungen der Augen bei seitlicher Neigung des Kopfes.

Wenn man den Kopf nach der Schulter neigt, so erleiden beide Augen eine der Drehung des Kopfes entgegengerichtete Rollung um

1 DONDERS, Holländ. Beitr. I. S. 382. 1846.
2 H. MEYER, Annal. d. Phys. u. Chem. LXXXV. S. 208. 1852.
3 ROLLET, Sitzgsber. d. Wiener Acad. XLII. 2. Abth. S. 488. 1860.
4 BECKER und ROLLET, ebenda XLIII. 2. Abth. S. 667. 1861.

die Gesichtslinie. Gesetzten Falls, man fixirt einen gradaus in der Ferne gelegenen Punkt und dreht den Kopf um eine von vorn nach hinten gehende Horizontalaxe nach rechts, d. i. positiv, so erfährt jedes Auge eine negative Rollung, derart also, dass die rechte Hälfte des mittlen Querschnittes gehoben wird. Bringt man den Kopf in die aufrechte Lage zurück, so werden auch die Augen wieder in die alte Stellung gerollt. Man kann sich hiervon leicht überzeugen, wenn man nach Donders' Vorschlag am oben (S. 473) beschriebenen Visirzeichen von Helmholtz statt des kurzen Querstreifens einen längeren und breiteren grauen Pappstreifen anbringt und auf demselben ein schmales rothes Band, das von rechts nach links läuft. Jedem Auge gerade gegenüber befindet sich auf dem Bande eine Marke zum Fixiren; liegen die Gesichtslinien parallel, so verschmelzen beide Marken haploskopisch. Fixirt man nun einige Zeit die haploskopische Marke und neigt dann ohne Veränderung der Fixation den Kopf stark zur Seite, so sieht man ein gegen das Band verdrehtes, dasselbe im Fixationspunkte durchschneidendes Nachbild. Man kann auch einen gleichfarbig grauen Papierstreifen mit querer Mittellinie benützen, auf welchem die beiden Fixationspunkte markirt sind. Auf den Pappstreifen legt man dann einen gleichfalls ganz ebenen, zur oberen Hälfte rothen, zur unteren grünen Cartonstreifen mit zwei Fixationspunkten auf der Grenzlinie der Farben, und zwar so, dass diese Punkte genau auf die Fixationspunkte des grauen Pappstreifens zu liegen kommen. Entfernt man nach Erzeugung des Nachbildes den farbigen Carton, so deckt die Mittellinie des Nachbildes die Mittellinie des Pappstreifens; neigt man aber den Kopf z. B. nach rechts, d. i. positiv, so verdreht es sich gegen diese Linie im negativen Sinne.

Durch analoge Versuche lässt sich zeigen, dass, wie Woinow fand, die Rollungen auch bei Convergenzstellung ganz dieselben sind, wie bei Parallelstellung. Am besten senkt man dabei, indem man die quere Mittellinie des Pappstreifens tiefer legt, die Blickebene so weit, dass trotz der Convergenz die mittlen Querschnitte in die Blickebene zu liegen kommen, weil man sonst die quere Linie in sich durchschneidenden Doppelbildern sieht.

Die Rollung ist in beiden Augen gleich stark. Man kann dies an den Nachbildern und nach einem Vorschlag von Donders auch auf folgende Weise beobachten:

An den vorderen Rand eines Brettchens, welches das von Helmholtz beschriebene Visirzeichen trägt, steckt man zwei verticale Drähte so, dass sie etwas weiter von der Mittelsäule abstehen, als

die beiden Spitzen des queren Papierstreifens. Dann betrachtet man z. B. in Primärstellung ein fernes Object, wobei die beiden Spitzen der Trugbilder des Querstreifens sich berühren, falls das Visirzeichen richtig eingestellt ist, und die beiden Drähte ungleichseitige Doppelbilder geben. Das linke Trugbild des rechten und das rechte des linken Doppelbildes erscheinen dabei nahe der Medianebene. Man richte die Drähte so, dass diese beiden Trugbilder genau parallel sind: neigt man dann den Kopf nach rechts oder links zur Schulter, so bleiben die Trugbilder parallel. Beweis, dass die Rollung in beiden Augen gleich stark ist.

Man hat, wie BREUER fand, eine verhältnissmässig starke vorübergehende Rollung, welche die erwähnte Bewegung des Kopfes begleitet, zu unterscheiden von der bleibenden Rollabweichung, welche fortbesteht, wenn man den Kopf dauernd geneigt hält. Die erstere geht schon nach 1—2 Secunden in die bleibende Rollabweichung zurück. Die Grösse der vorübergehenden Rollung fand MULDER für verschieden grosse Bewegungen des Kopfes ungefähr gleich, wenn nur die Schnelligkeit der Bewegung dieselbe war. Wenn man mit der oben beschriebenen Vorrichtung experimentirt und bei Convergenzstellung durch den binocularen, bei Parallelstellungen durch einen der beiden unocularen Fixationspunkte einen Faden spannt, der die quere Mittellinie des farbigen Cartons unter einem Winkel von 15—20° durchschneidet, so kann man bei rascher Seitwärtsneigung

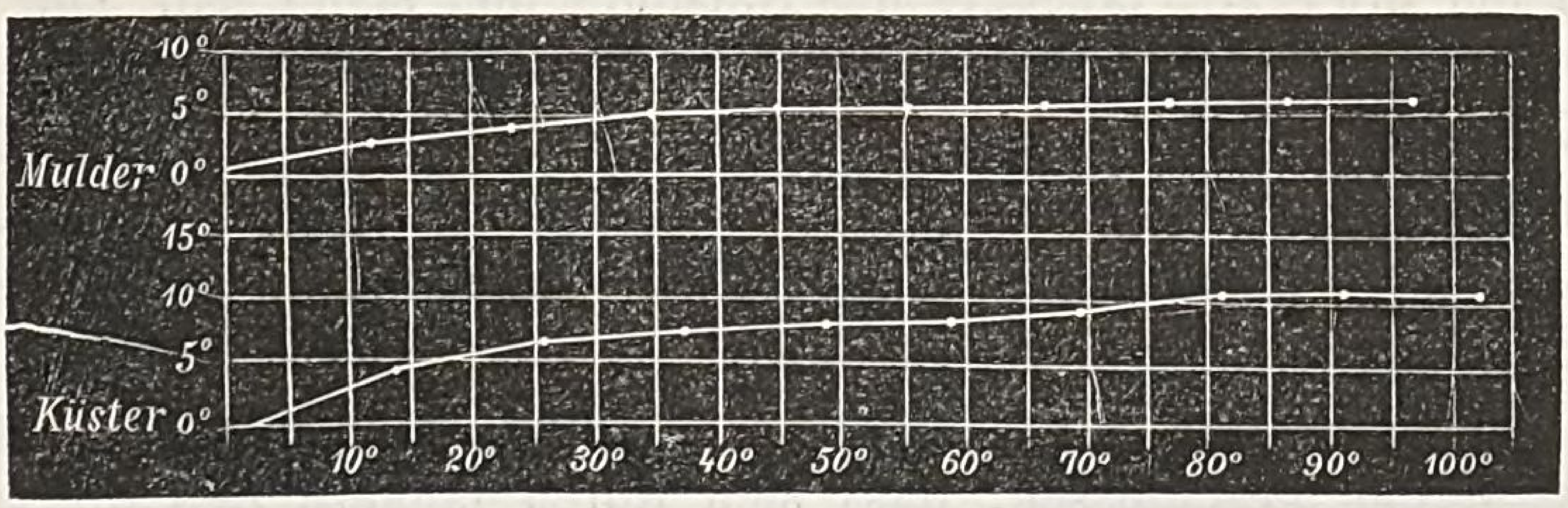


Fig. 50.

des Kopfes beobachten, ob das Nachbild der Farbengrenzlinie sich so weit dreht, dass es mit dem Faden zusammenfällt. Durch passende Verstellung des Fadens lässt sich dies erreichen, wenn es nicht zufällig gleich anfangs der Fall war. MULDER beobachtete auf diese Weise Rollung bis zu 20°.

Ueber die bleibende Rollabweichung haben MULDER und KÜSTER zahlreiche Messungen angestellt. Die Curven in Fig. 50 veranschaulichen das Verhältniss zwischen dem Winkel der Kopfneigung und demjenigen der bleibenden Rollabweichung. Die Länge der Abscissen

stellt die Kopfneigungen, die Länge der Ordinaten die entsprechenden Rollabweichungen nach gleichem Maassstabe vor. Man sieht, dass die Abweichung anfangs rascher, dann langsamer mit der Kopfneigung wächst, und über 50^0 Kopfneigung hinaus nur noch äusserst wenig zunimmt.

Eine Abweichung des Kopfes in Folge von Drehung um seine Verticalaxe nach rechts oder links bis 20^0, oder eine Neigung desselben nach vorn oder hinten hatte keinen merklichen Einfluss auf die Grösse der Rollung.

Die bleibende Abweichung hängt, wie Nagel zeigte, lediglich von der Neigung des Kopfes ab, gleichviel, wie die letztere herbeigeführt wurde, ob man nur den Kopf oder zugleich den Oberkörper geneigt hat. Auch ist es gleichgültig, ob die Neigung des Kopfes activ oder passiv herbeigeführt wurde; man kann sich, statt den Kopf selbst zu neigen, denselben von einem Andern zwischen die Hände nehmen und neigen lassen. Auch wenn man auf der Seite liegt, zeigt sich, wie Nagel fand, die Abweichung.

Die Rollabweichung ist eine dauernde, wenn der Kopf in der zur Verticalebene des Raumes geneigten Lage verharrt. Um dies zu zeigen, erzeugte Mulder ein Nachbild, nachdem er bereits 15 Minuten lang den Kopf geneigt gehalten hatte, und richtete sich dann auf. Es ergab sich, dass in diesen 15 Minuten die Rollabweichung sich nicht geändert hatte. Ferner legte er sich durch 45 Minuten horizontal auf die Seite, erzeugte das Nachbild und stand auf. Die nun bleibende Abweichung des Nachbildes betrug $5^0 2$, während er bei 90^0 Neigung des Kopfes 6^0 erhalten hatte. Küster erhielt bei demselben Versuche $8^0 5$ Abweichung nach dem Aufstehen statt $10^0 6$, die er sonst bei 90^0 Neigung des Kopfes gefunden hatte. Dass es sich hierbei wirklich um das Zurückgehen einer bestandenen und nicht um eine durch das Aufstehen bewirkte neue Rollung handelt, wurde daraus geschlossen, dass sich durch längere Zeit die Lage des Nachbildes nicht änderte.

Bringt man, wie Donders that, vor das eine Auge ein Spiegelchen auf einem mit den Zähnen gehaltenen Brettchen, so kann man sein eigenes Auge während der Rollung beobachten, ohne dass sich die Stellung der Gesichtslinie zum Spiegel ändert, wenn man den Kopf neigt. Ist man nicht sehr kurzsichtig, so nimmt man statt des Planspiegels eine auf der einen Seite versilberte Sammellinse. Donders „neigte den Kopf zur Seite, bis eine Arteria ciliaris gerade hinter dem Augenlide verschwand, und stillhaltend sah er sie nicht mehr als 0,5 mm. zurücktreten; wenn er nun aus der geneigten Stel-

lung wieder in die senkrechte überging, kam das Gefäss weit über dem Augenlide zum Vorschein um wieder 0,5 bis 1 mm. zu sinken".

Ueber die tieferen Ursachen dieser Rollungen und ihre Bedeutung für die räumliche Wahrnehmung bestehen sehr verschiedene Ansichten. NAGEL bringt sie in Beziehung zur Erhaltung des Gleichgewichts, nach BREUER und MACH [1] werden sie von den Nerven der Bogengänge des Labyrinths ausgelöst. DONDERS erklärt sie dagegen für eine mit der Neigung des Kopfes associirte Bewegung, „die für die gewöhnliche Bewegung des Kopfes ein genügendes Hilfsmittel zur Compensation ist".[2]

Die Rollung der Augen bei Neigung des Kopfes wurde, wie NAGEL angiebt, zuerst von JOHN HUNTER erwähnt. Später erörterte sie ausführlich HUECK [3], doch waren seine Beobachtungen keine messenden und er meinte, dass durch die Rollung bei nicht zu starker Neigung des Kopfes die letztere durch die Rollung vollständig compensirt werde. Weil aber das Nachbild eines verticalen Bandes bei jeder Seitwärtsneigung des Kopfes sich auch auf der Wand neigt, hielten RUETE und DONDERS HUECK's Angaben für unrichtig, bis JAVAL [4] die Rollungen mit Hülfe seines Astigmatismus beobachtete. Sie wurden dann von NAGEL [5] in derselben Weise, von SKREBITZKI [6] mit Nachbildern genauer untersucht. Weitere Mittheilungen machten DONDERS [7], WOINOW [8], BREUER [9] und MULDER [10]. Letzterer benutzte folgende von DONDERS [11] angegebene Methode: „Das für die Versuche construirte Instrument besteht aus einem Kopfhalter, welcher sich um eine horizontale, zur Grundlinie senkrechte Axe dreht (Seitwärtsneigung also gegen die Schulter), und bei jeder Einstellung durch den Beobachter schnell und leicht zu fixiren ist. Wenn der Kopf darin festgehalten wird, und zwar genau in der Primärstellung, betrachtet das Auge ungefähr 20 Secunden lang eine von entfernten Gasflämmchen gebildete Lichtlinie, die sich im Querdurchmesser einer grossen Scheibe befindet, löscht die Flämmchen durch eine kleine Handbewegung bis auf ein Minimum aus, dreht nun den Kopf im Kopfhalter und stellt diesen durch eine zweite Handbewegung wieder fest, gerade während das Nachbild mit einem in einem Diameter der Scheibe von bekannter Richtung

1 MACH, Grundlinien der Lehre von d. Bewegungsempfindungen. Leipzig 1875.
2 Arch. f. Ophthalmologie XXI. (1) S. 114. 1875.
3 HUECK, Die Axendrehung des Auges. Dorpat 1838.
4 JAVAL, Traité théoretique et pratique des maladies des yeux, par L. WECKER. II. p. 815. Paris 1866. (citirt nach MULDER.)
5 NAGEL, Arch. f. Ophthalmologie XVII. (1) S. 237. 1871.
6 SKREBITZKI, Arch. f. Ophthalmologie XVII. (1) S. 107. 1871.
7 DONDERS, Klin. Monatsblätter S. 389. 1871. (citirt nach MULDER.)
8 WOINOW, Arch. f. Ophthalmologie XVII. (2) S. 233 und Klin. Monatsblätter S. 387. 1871.
9 BREUER, Ueber die Function der Bogengänge des Ohrlabyrinths. Med. Jahrb. 1. Heft. 1874 und 1. Heft 1875.
10 MULDER, Arch. f. Ophthalmologie XXI. (1) S. 68. 1875.
11 DONDERS, Arch. f. d. ges. Physiol. XIII. S. 409. 1876.

ausgespannten Faden zusammenfällt, und der Unterschied zwischen der Neigung dieses Durchmessers und der des Kopfes, die sich beide genau bestimmen lassen, ist die Rollbewegung.“

Helmholtz hatte, ohne noch die hier erörterten Rollungen zu kennen, den oben beschriebenen Nachbildversuch zum Beweise des Listing'schen Gesetzes auch so angestellt, dass er zur Untersuchung der schrägen Bahnen der Gesichtslinie nicht den Nachbild erzeugenden Streifen auf der Wand, sondern den Kopf neigte, wobei er die Primärstellung der Gesichtslinie an dem Visirzeichen controlirte. Er fand auch so, dass die Gesichtslinie die primären Bahnebenen ohne Rollung des Auges durchmass. Hieraus würde sich also ergeben, dass die Primärstellung der Gesichtslinie und das Bewegungsgesetz der Augen sich nicht ändert, auch wenn die Augen durch die beschriebenen Rollungen eine andere Lage in der Orbita haben und sämmtliche Muskeln in etwas anderer Weise am Augapfel angreifen, falls nicht etwa die verhältnissmässig weiten Fehlergrenzen der Methode den Versuch getrübt haben.

VI. Die Augenmuskeln.

So gut uns gegenwärtig die Augenbewegungen bekannt sind, so wenig wissen wir noch über den Antheil, den die einzelnen Augenmuskeln an jeder bestimmten Bewegung haben.

Die sechs Augenmuskeln sind so angeordnet, dass je zwei sich beiläufig als Antagonisten verhalten, insofern sie den Augapfel ungefähr um dieselbe Axe, jedoch in entgegengesetzter Richtung zu drehen streben. Innerhalb welcher Grenzen sich bei den verschiedenen Stellungen des Auges die Abweichungen jedes Muskelpaares vom Antagonismus bewegen, ist nicht bekannt. Indessen werden diese Abweichungen sicher nie so gross sein, dass sich nicht auf Grund des annähernd antagonistischen Verhaltens je zweier Muskeln annehmen liesse, dass jede bestimmte Drehung des Augapfels nur auf eine einzige Weise, d. h. immer wieder von denselben Muskeln und mit demselben Verhältniss der Anstrengung der einzelnen Muskeln erzeugt wird. Wenn es gilt, das Auge aus irgend einer Stellung um irgend welche Axe herauszudrehen, so steht bei strengem Antagonismus jedes Muskelpaares die Wahl der zur Drehung erforderlichen Muskeln, schon theoretisch genommen, nicht frei, sondern es giebt nur eine einzige Art der Innervation und der entsprechenden Muskelaction, durch welche die Drehung herbeigeführt werden kann. Praktisch genommen gilt dieser Satz auch dann, wenn der Antago-

nismus der einzelnen Muskelpaare kein genauer ist. Ein Vicariren verschiedener Muskeln untereinander ist also bei strengem Antagonismus überhaupt nicht denkbar; bei nur angenähertem Antagonismus aber deshalb thatsächlich ausgeschlossen, weil die vicarirenden Muskeln, welche das nöthige Drehungsmoment aufbringen könnten, dies nur mit einem ganz unverhältnissmässig grossen Kraftaufwande vermöchten.

Um den Antheil bestimmen zu können, welchen die einzelnen Muskeln an der Ausführung einer bestimmten Drehung haben, sucht man zuvörderst für jeden Muskel die Resultirende aus dem Zuge seiner sämmtlichen Einzelfasern zu finden. Zu diesem Zwecke denkt man sich durch die geometrischen Mittelpunkte der Muskelursprünge und Ansätze und durch den Drehpunkt eine Ebene gelegt und auf derselben im Drehpunkt eine Senkrechte errichtet: diese betrachtet man als die Axe des Drehbestrebens des Muskels, und um zugleich die Richtung der angestrebten Drehung zu bestimmen, bezeichnet man die Axenhälfte derjenigen Seite, von welcher aus gesehen die Drehung im Sinne der Bewegung eines Uhrzeigers erfolgen würde, als die Halbaxe der Drehung. Eine der Kraft des Drehbestrebens proportionale, aus dem Drehpunkte auf diese Halbaxe aufgetragene Strecke ist das vom Muskel erzeugte Drehungsmoment.

Die Bestimmung des Mittelpunktes der fächerartig ausgebreiteten Muskelansätze unterliegt einer gewissen Willkür; einen genauen Drehpunkt giebt es nicht; die angenommene Resultirende setzt voraus, dass die Muskelfasern ganz symmetrisch zu derselben vertheilt sind; der Mittelpunkt des interaxialen Raumes liegt nicht genau im Krümmungsmittelpunkte einer sphärischen Hinterfläche des Augapfels. Aus allen diesen Gründen versteht sich, warum auch unter der Annahme, dass sämmtliche Fasern eines Muskels immer gleichzeitig und gleich stark innervirt werden, eine genaue Bestimmung der Halbaxen des Drehbestrebens nicht möglich ist.

Die Axe, um welche bei einer gegebenen Augenstellung ein Muskel das Auge zu drehen strebt, ist nicht nothwendig auch die unveränderliche Axe der wirklichen Drehung, welche der Muskel erzeugt, wenn er sich allein contrahirt, und zwar auch dann nicht, wenn man annehmen darf, dass durch die, während der Bewegung erfolgende Verschiebung des Muskelansatzes relativ zum Muskelursprung keine Lagenänderung des Drehungsmomentes bewirkt wird. Wie der Weg eines Schiffes nicht blos von der Richtung der treibenden Kraft abhängt, sondern auch von der Richtung der Widerstände und insbesondere der Stellung des Steuers, so hängt auch die Drehung, welche ein Muskel bewirkt, nicht allein ab von der Lage und Grösse des

von ihm erzeugten Drehungsmomentes, sondern zugleich von der Lage und Grösse des, aus dem gleichzeitigen Zuge aller übrigen Muskeln und den sonstigen Anheftungen des Augapfels an der Orbita resultirenden Drehungsmomentes. Nur insoweit man annehmen darf, dass das aus den Widerständen der Drehung resultirende Moment immer in derselben Axe liegt, wie das vom Muskel erzeugte, darf man die Axe, um welche ein Muskel das Auge aus einer bestimmten Anfangslage herauszudrehen strebt, auch als die Axe der wirklich erfolgenden Drehung ansehen.

Betreffs der Annahme, dass die Lage des Drehungsmomentes, welches ein bestimmter Muskel erzeugt, sich bei den verschiedenen Stellungen des Auges nicht wesentlich ändert, hat HELMHOLTZ[1] auf die Bedeutung des breiten, fächerförmigen Ansatzes der Muskeln am Bulbus hingewiesen. „Nehmen wir“, sagt er, „als Beispiel den rectus super. und infer., so spannen sich, wenn das Auge nach innen gedreht wird, bei der Verkürzung des Muskels vorwiegend die Fasern der Sehne, welche nach dem äussern Rande der Hornhaut hin gerichtet sind, weil diese am meisten verlängert sind.“ „Wenn sich das Auge nach aussen dreht, wirken dagegen hauptsächlich die innern Stränge beider Sehnen. So bleibt die Richtung des Muskelzuges dieselbe, trotz der veränderten Stellung des Auges.“

Die Widerstände der Drehung sind, sofern es sich nur um das für gewöhnlich benutzte kleine Gebiet der Lagenänderungen handelt, im Wesentlichen in den nichtactiven Muskeln und hauptsächlich in den Antagonisten der jeweiligen activen Muskeln zu suchen, daher das aus sämmtlichen Widerständen resultirende Drehungsmoment seine Lage während der Drehung auch nicht erheblich ändern wird.

FICK[2], RUETE[3] und insbesondere VOLKMANN[4] haben auf Grund anatomischer Untersuchung die Lage der Axen zu bestimmen gesucht, um welche jeder Muskel bei einer bestimmten Mittelstellung das Auge zu drehen strebt. Diese Mittelstellung war sicher bei den verschiedenen Augen verschieden, dürfte aber nicht sehr erheblich von der Primärstellung differirt haben. Das allgemeine Ergebniss dieser Untersuchungen ist, dass die Axe des äussern und innern Geraden beiläufig senkrecht zur primären Blickebene, die Axen der übrigen Muskeln dieser Ebene mehr oder weniger nahe liegen, und zwar die gemeinschaftliche Axe des obern und untern Geraden unter einem Winkel von beiläufig 66°—71°, die gemeinschaftliche Axe

1 HELMHOLTZ, Physiol. Optik. S. 471.
2 FICK, Ztschr. f. rat. Med. (3) IV. S. 101. 1853.
3 RUETE, Ein neues Ophthalmotrop. Leipzig 1857.
4 A. W. VOLKMANN, Ber. d. sächs. Ges. d. Wiss. 6. Febr. 1869. S. 28.

der beiden Schiefen unter einem Winkel von beiläufig 36° — 38° zur Gesichtslinie, wie dies Fig. 51 schematisch darstellt. Dieselbe ist der Horizontalschnitt des linken Auges von oben gesehen; *ou* ist die Verbindungslinie der beiden Drehpunkte (Grundlinie), die unterbrochene Linie die Gesichtslinie; die vier Halbaxen des Drehbestrebens des Rectus superior und inferior, sowie der beiden Obliqui sind mit den entsprechenden Anfangsbuchstaben bezeichnet. Eine durch den Drehpunkt *m* gelegte Senkrechte würde mit ihrer obern Hälfte die dem Rectus internus, mit ihrer untern Hälfte die dem Rectus externus zugehörige Halbaxe darstellen.

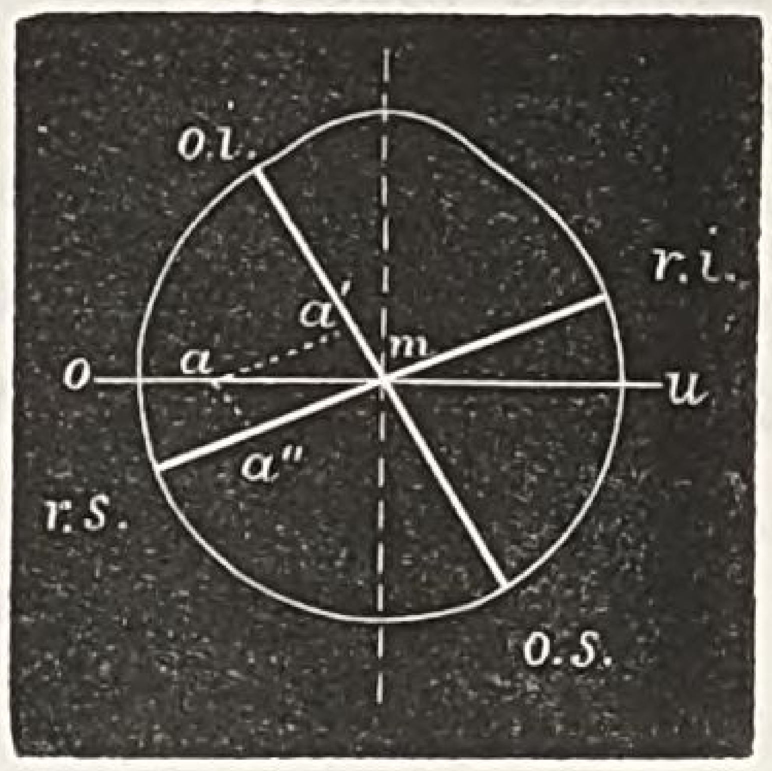


Fig. 51.

Fig. 52 versinnlicht annähernd die Bahnen, welche die Gesichtslinie des linken Auges auf einer zur Primärstellung senkrechten und

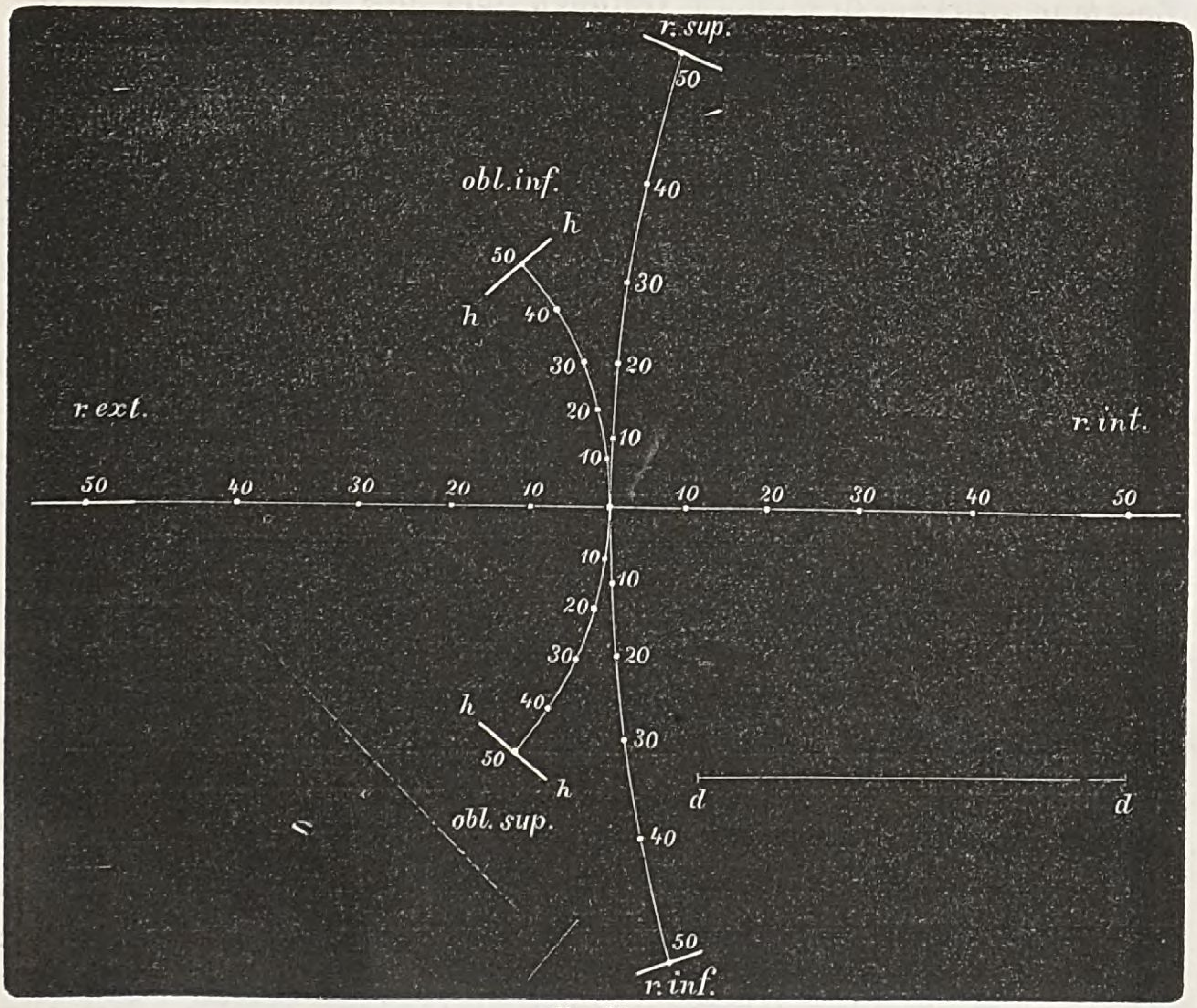


Fig. 52.

um die Strecke *dd* vom Drehpunkte abstehenden Ebene beschreiben müsste, wenn das Auge um eine der genannten sechs Halbaxen gedreht würde. Der Figur ist die Anahme RUETE's zu Grunde gelegt,

nach welcher die Axe des obern und untern Geraden um 71°, die der Schiefen um 38° von der Gesichtslinie abweicht, wobei bemerkt werden muss, dass die Angaben VOLKMANN's hiervon nicht unwesentlich verschieden sind (s. u.). Am Ende jeder Blickbahn ist durch einen Strich die scheinbare Lage eines Nachbildes angegeben, welches das Auge in der Primärstellung von einem fixirten horizontalen Streifen aufgenommen hat. Die Länge jeder Bahn entspricht einer Drehung des Auges um 50°; die Zahlen geben die Grösse des jeweiligen Winkels der erfolgten Drehung an. Die krummen Bahnen sind hyperbolisch.

Nach LISTING's Gesetz liegt die primäre Axenebene senkrecht zur Gesichtslinie. In diese Ebene fällt, wie man sieht, nur die Halbaxe des vom äussern oder innern Geraden erzeugten Drehbestrebens. Ein in der Linie *mo* Fig. 51 liegendes und also auf verticale Hebung der Gesichtslinie gerichtetes Drehungsmoment kann nur durch das Zusammenwirken des obern Geraden und des untern Schiefen erzeugt werden, sofern man annehmen darf, dass deren Halbaxen in der primären Blickebene liegen. Soll z. B. das Drehungsmoment *ma* (Fig. 51) entstehen, so muss der obere Gerade das Moment *ma''*, der untre Schiefe das Moment *ma'* erzeugen, aus welchen beiden dann das Moment *ma* resultirt. Analog kann ein auf verticale Senkung der Gesichtslinie gerichtetes Moment nur durch eine bestimmte Art des Zusammenwirkens des untern Geraden mit dem obern Schiefen entstehen. Soll die Gesichtslinie in schräger Bahn z. B. nach oben und aussen bewegt werden, so muss sich die gemeinsame Thätigkeit des obern Geraden und untern Schiefen verbinden mit der Thätigkeit des äussern Geraden, und es ist bemerkenswerth, dass das Verhältniss der von den ersteren beiden Muskeln erzeugten Momente unter sich hierbei ganz dasselbe sein muss, wie bei gerader Hebung der Gesichtslinie. Analoges gilt von allen übrigen schrägen Bewegungen.

HERING[1] hat ein hypothetisches Gesetz aufgestellt, nach welchem sich der Antheil, den die einzelnen Muskeln an den verschiedenen Bewegungen haben, leicht übersehen lassen würde. Er meint, dass der Blickpunkt innerhalb des engeren Blickfeldes durch dieselbe Innervation und Muskelaction, durch welche er aus der Primärstellung in verticaler Bahn gehoben oder gesenkt wird, auch aus jeder Secundärstellung vertical gehoben oder gesenkt werden kann, und dass der analoge Satz für jede Bewegung des Blickpunktes in horizontaler und der Frontalebene paralleler Richtung gilt. Daraus würde sich weiter ergeben, dass allen unter sich parallelen Blickbahnen auf einem, der Frontalebene parallelen Gesichtsfelde eine und dieselbe Innervation und Muskelaction entspricht.

1 HERING, Die Lehre vom binocularen Sehen. § 9.

Alle Abweichungen von diesem Gesetze im weiteren Blickfelde sollen sich nach HERING durch entsprechende Störungen der Localisirung des Kernpunktes verrathen. Er stützt das Gesetz vorwiegend auf theoretische Gründe, welche sich aus den im nächsten Capitel gemachten Erörterungen ergeben.

Positive Rollungen bei feststehender Gesichtslinie können nach dem auf Seite 515 gegebenen Schema linkerseits nur durch gleichzeitige Action des obern Schiefen und obern Geraden, negative nur durch Zusammenwirken des untern Schiefen und untern Geraden eingeleitet werden.

Ob die Augenmuskeln beim Sehen unter einer tonischen Innervation stehen, so dass es keine Stellung des Auges gibt, bei der nicht sämmtliche Muskeln, wenn auch zum Theil nur schwach, in Thätigkeit sind, ist nicht entschieden [1]).

Die sorgfältigsten Bestimmungen des Ursprunges und Ansatzes der Augenmuskeln verdanken wir VOLKMANN, welcher 30 Leichen darauf untersuchte. Mit RUETE nimmt VOLKMANN an, dass die Augen des Todten sich in der Primärstellung befinden. Zur Begründung dieser Annahme führt er an, dass die Pupillendistanz in diesen 30 Fällen im Minimum 55 mm., im Maximum 70 mm., im Mittel 63,8 mm. betrug, während er sie bei 30 lebenden Erwachsenen beim Sehen in die Ferne im Minimum 58 mm., im Maximum 70 mm., im Mittel 63,1 mm. gross fand. Leichen wie Lebende waren überwiegend männlichen Geschlechts. Da nach PANUM [2] die Abstände der Drehpunkte beider Augen bei Erwachsenen um mehr als 20 mm. differiren können, so erscheint VOLKMANN's Kriterium für die durchschnittliche Primärlage der Augen bei Leichen unsicher. Ueberdies wird durch die Pupillendistanz die Lage der Blickebene nicht controlirt.

Durch den Drehpunkt denkt sich VOLKMANN die Axen eines rechtwinkligen Coordinatensystems gelegt; die Verbindungslinie der Drehpunkte ist die x-Axe, ihre rechte Hälfte positiv; die Gesichtslinie d. i. die der Medianebene parallele Horizontale ist die y-Axe, deren positive Hälfte nach hinten liegt. Die Lage dieser Axe relativ zum Kopfe ist natürlich abhängig von der Wahl der aufrechten Kopfstellung; die auf den genannten beiden Axen senkrecht stehende z-Axe ist zur oberen Hälfte positiv. Bezogen auf diese Axen fand VOLKMANN folgende Werthe:

Muskeln des rechten Auges	Ursprünge			Ansätze		
	x	y	z	x	y	z
rectus superior	— 16	31,76	3,6	0,0	— 7,63	10,48
rectus inferior	— 16	31,76	— 2,4	0,0	— 8,02	— 10,24
rectus externus	— 13	34,0	0,6	10,08	— 6,50	0,0
rectus internus	— 17	3,00	0,6	— 9,65	— 8,84	0,0
obliquus superior	— 15,27	— 8,24	12,25	2,90	4,41	11,05
obliquus inferior	— 11,10	— 11,34	— 15,46	— 8,71	7,18	0,0

1 vergl. HERING, Sitzgsber. d. Wiener Acad. 3. Abth. LXXIX. S. 137. 1879.
2 PANUM, Nordiskt med. Arkiv VII. No. 9. 1875 (citirt nach dem Jahresber. für Anat. u. Physiol. v. Hofmann u. Schwalbe).

Hieraus ergibt sich u. A., dass die Halbaxen des äussern und innern Geraden ziemlich genau senkrecht zur primären Blickebene, die der vier übrigen jedoch nicht in derselben liegen, und zwar weichen sie um folgende Winkel von der Blickebene ab:

			im rechten Auge	im linken Auge
Die Halbaxe des	rect. super.	um 17°5′	nach unten	nach oben
„ „ „	rect. infer.	„ 18°34′	„ „	„ „
„ „ „	obliq. infer.	„ 6°14′	„ „	„ „
„ „ „	obliq. super.	„ 10°45′	„ oben	„ unten

Nur der obere und innere Gerade sind also ziemlich genaue Antagonisten.

Es folgt aus Volkmann's Angaben, dass zwar ein nach innen oder aussen gerichtetes Drehungsmoment durch alleinige Verkürzung des innern oder äussern Geraden erzeugt werden könnte, dass aber zur Herstellung eines gerade nach oben gerichteten Moments sich der Anspannung des obern Geraden und untern Schiefen noch eine kleine Anspannung des äussern Geraden zugesellen müsste, und dass dieser Muskel auch an der Erzeugung eines nach unten gerichteten Moments, doch hier in viel schwächerem Maasse sich betheiligen müsste. Ebenso würde ein im linken Auge auf negative, im rechten auf positive Rollung um die feststehende Gesichtslinie gerichtetes Moment nur unter wesentlicher Mitbetheiligung des äussern Geraden zu Stande kommen, während für die entgegengesetzte Rollung die gemeinsame Action des obern Schiefen und obern Geraden nahezu genügen würde.

Volkmann hat auch Bestimmungen der Länge, des Gewichts, des mittlen Querschnitts und des relativen Gewichts der Augenmuskeln gemacht und dafür folgende Mittelwerthe gefunden:

	rectus superior	rectus internus	rectus inferior	rectus externus	obliquus superior	obliquus inferior
Gewicht	0,514	0,747	0,671	0,715	0,285	0,288 grm.
Länge	41,8	40,8	40,0	40,6	32,2	34,5 mm.
Querschnitt	11,34	17,39	15,85	16,73	8,36	7,89 □ mm.
relative Schwere	1	1,45	1,30	1,39	0,55	0,57

Endlich hat Volkmann auch die Länge der auf den Augapfel aufgewickelten Strecke jedes Muskels zu bestimmen versucht, von deren Grösse das Maximum der Drehung abhängt, welche der Muskel, theoretisch genommen, erzeugen kann. Er setzte dabei einen

kugligen Augapfel und einen im Centrum desselben liegenden Drehpunkt voraus. „In nachstehender Tabelle bezeichnet λ die Länge der aufgewickelten Strecke des Muskels, welche hier zugleich das Maass seiner grössten Verkürzung ist; Λ ist die berechnete Länge des ganzen Muskels bei der Primärstellung, L dieselbe Länge nach Aussage der Messung mit Ausschluss der Sehne und $\frac{\lambda}{L}$ das Verhältniss der maximalen Verkürzung zur Länge des Muskels in der Primärstellung."

Muskeln	λ	Λ	L	$\frac{\lambda}{L}$
rectus superior	8,92 mm.	43,72 mm.	41,8 mm.	0,21
rectus inferior	9,83 „	44,50 „	40,0 „	0,24
rectus externus	13,25 „	48,86 „	40,6 „	0,32
rectus internus	6,33 „	39,82 „	40,8 „	0,15
obliquus superior	5,23 „	—	32,2 „	0,16
obliquus inferior	16,74 „	34,43 „	34,5 „	0,48

„Der Werth Λ für den M. obliquus superior ist absichtlich nicht mit aufgenommen, weil er sich nur auf die Sehne des Muskels bezieht."

ELFTES CAPITEL.

Die Association der Augenbewegungen.

Die Stellungen und Bewegungen des einzelnen Auges sind nicht genügend verständlich, wenn man nicht auch seine Beziehungen zum anderen Auge berücksichtigt. So sahen wir schon S. 496 dass bei gleicher Stellung der Gesichtslinie relativ zum Kopfe die Lage der Netzhaut mit abhängig ist von der jeweiligen Stellung des anderen Auges.

Die beiden Augen sind bei ihren Bewegungen derart mit einander verknüpft, dass das eine nicht unabhängig vom anderen bewegt wird, vielmehr auf einen und denselben Willensantrieb die Musculatur beider Augen gleichzeitig reagirt. Daher sind wir im Allgemeinen nicht im Stande, ein Auge ohne das andere zu heben oder zu senken, sondern beide Augen heben und senken sich gleichzeitig und gleich

stark. Ebensowenig können wir zum Zwecke der Rechts- oder Linkswendung die Muskeln eines Auges allein innerviren. Zwar ist es uns möglich, beide Augen gleichzeitig um verschiedene Winkel und mit verschiedenen Geschwindigkeiten nach links oder rechts, einwärts oder auswärts zu bewegen und sogar, während ein Auge feststeht, das andere auswärts oder einwärts zu drehen, was für eine gegenseitige Unabhängigkeit der Augen bei ihren Bewegungen zu sprechen scheint; doch hat Hering[1]) gezeigt, dass sich diese ungleichmässigen Bewegungen recht wohl mit der Annahme einer gleichmässigen Innervation in Einklang bringen lassen. Nach seiner Ansicht sind solche Bewegungen nicht etwa deshalb möglich, weil wir im Stande wären, gleichzeitig jedem Auge eine besondere Innervation zuzuwenden, sondern weil dabei jedes Auge von zwei Innervationen getroffen wird, deren eine auf eine Wendung beider Augen nach rechts oder links, deren andere auf eine Einwärts- oder Auswärtsdrehung beider Augen gerichtet ist. Indem diese beiden Innervationen des Doppelauges sich im einen Auge gegenseitig unterstützen, im anderen aber entgegenwirken, muss die wirklich eintretende Bewegung in beiden Augen nothwendig eine verschiedene sein.

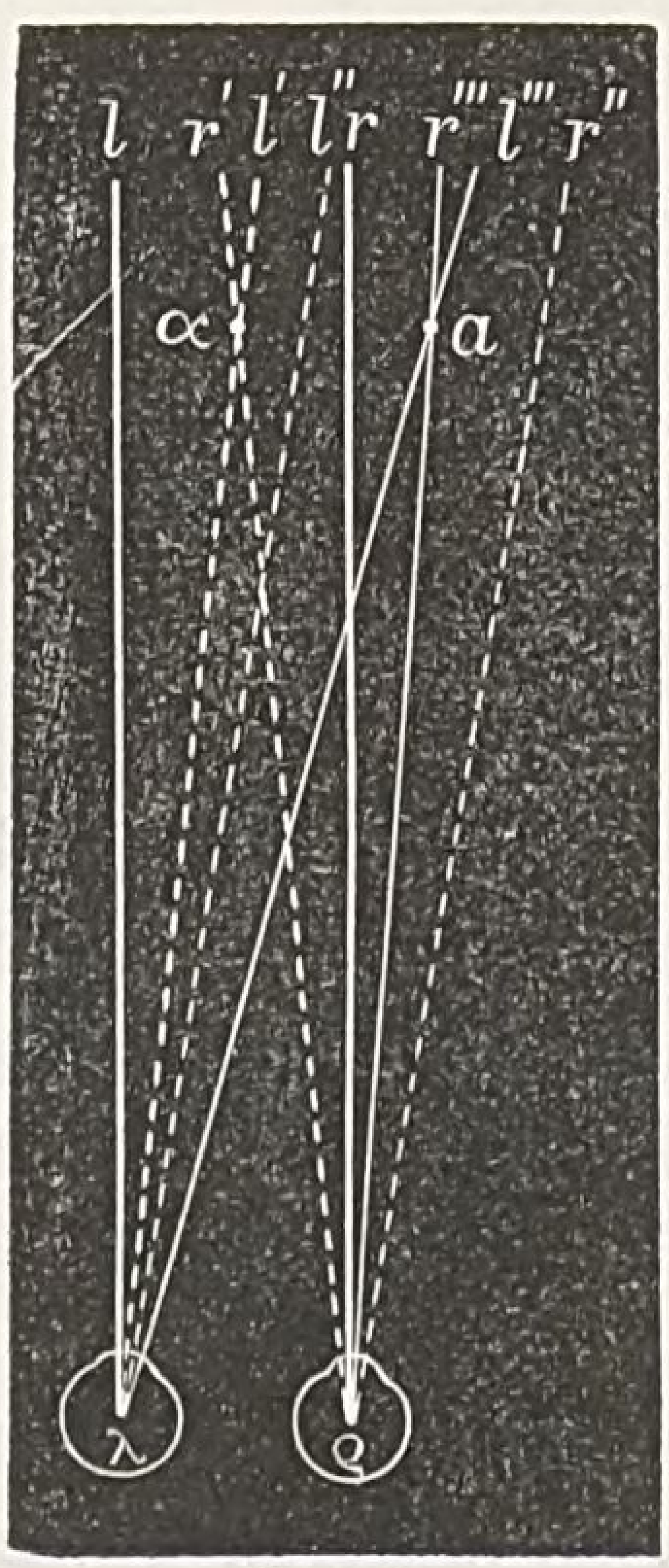


Fig. 53.

Blicken z. B. beide Augen (Fig. 53) zunächst gerade aus in weite Ferne, wobei die Gesichtslinien $\lambda\, l$ und $\varrho\, r$ parallel liegen, und es zieht ein nach rechts und in grösserer Nähe erscheinendes Object a unsere Aufmerksamkeit auf sich, so haben wir erstens Veranlassung, das Doppelauge auf die dem Objecte entsprechende Nähe einzustellen, und demgemäss erfolgt eine Innervation beider Augen zur Convergenz, durch welche Innervation an und für sich, da sie beide Augen zu gleich starker Wendung nach innen antreibt, die anfangs parallelen Gesichtslinien auf den etwa gleich nahe wie a gelegenen Punkt α eingestellt werden würden, wie es die unterbrochenen Linien $\lambda\, l'$ und $\varrho\, r'$ darstellen. Ausserdem aber haben wir, da das Object a, welches wir deutlich sehen wollen, nach rechts erscheint, auch Veranlassung, das Doppelauge nach rechts zu wenden, und dem gemäss erfolgt eine Innervation beider Augen zur Wendung nach rechts, durch welche Innervation an und für sich, da sie ebenfalls beiderseits gleich stark wirkt, beide Augen um gleiche Winkel nach rechts gewendet werden, und ihre Gesichtslinien zuletzt in die durch die unterbrochenen Linien $\lambda\, l''$ und $\varrho\, r''$ versinnlichte Stellung kommen würden. Beide Innervationen erfolgen nun aber gleichzeitig und es bekommt somit

1 Hering, Lehre vom binocul. Sehen. § 2.

die linke Gesichtslinie erstens einen Antrieb zur Einwärtswendung um den Winkel $l \lambda l'$ und zweitens einen Antrieb zur Rechtswendung um den Winkel $l \lambda l''$; infolge dieses doppelten Antriebes wird die linke Gesichtslinie um $\sphericalangle l \lambda l' + \sphericalangle l \lambda l'' = \sphericalangle l \lambda l'''$ nach rechts gedreht und also auf den Punkt a eingestellt. Die rechte Gesichtslinie bekommt erstens einen Antrieb zur Einwärtswendung um $\sphericalangle r \varrho r'$; und zweitens einen Antrieb zur Rechtswendung um $\sphericalangle r \varrho r''$; beide Antriebe wirken in entgegengesetzter Richtung. Demnach bewegt sich die Gesichtslinie in der Richtung des stärkeren Antriebes nach rechts, und zwar um $\sphericalangle r \varrho r'' - \sphericalangle r \varrho r' = \sphericalangle r \varrho r'''$, wird also ebenfalls auf Punkt a eingestellt. So resultirt, trotzdem, dass beide Innervationen auf beide Augen gleich stark erfolgen, doch eine verschiedene Bewegung beider Augen, weil beide Innervationen im einen Auge sich einander unterstützen, im andern sich gegenseitig hemmen.

Nach dieser Auffassung werden also beide Augen, was ihre Bewegungen im Dienste des Gesichtssinnes betrifft, wie ein einfaches Organ gehandhabt. Dem bewegenden Willen gegenüber ist es gleichgiltig, dass dieses Organ in Wirklichkeit aus zwei gesonderten Gliedern besteht, weil er nicht nöthig hat, jedes der beiden Glieder für sich zu bewegen und zu lenken, vielmehr ein und derselbe Willensimpuls beide Augen gleichzeitig beherrscht, wie man ein Zwiegespann mit einfachen Zügeln leiten kann.

Man könnte daran denken, dass die antagonistischen Innervationen, welche unter den genannten Bedingungen auf ein und dasselbe Auge ausgeübt werden, nicht wirklich zu entsprechenden Spannungen der hierbei in Betracht kommenden antagonistischen Muskeln (rect. int. und ext.) führen, sondern sich schon im Centralorgane gegenseitig aufheben oder das Gleichgewicht halten. Hering[1] nimmt an, dass es wirklich zu entsprechend stärkerer Spannung der Antagonisten komme, was sich durch eine, bis jetzt nicht nachgewiesene Steigerung des interoculären Druckes verrathen müsste.

Die Richtung, in welcher der Blickpunkt in Beziehung zu unserem Kopfe gelegen ist, also die Blickrichtung des Doppelauges, wollen wir uns durch eine gerade Linie versinnlichen, welche den Blickpunkt mit einem etwa in der Mitte zwischen beiden Augen gelegenen Punkte verbindet, und diese Linie heisse die binoculare Blicklinie. Dieselbe ändert ihre Lage, sobald unser Blick nach rechts oder links oben oder unten wandert; aber der Blick kann auch entlang der unbewegten Blicklinie in grössere Nähe oder grössere Ferne gehen.

Wir können uns demnach auch hier wieder (vgl. S. 392) beide Augen durch ein einziges imaginäres Auge repräsentirt denken, wel-

1 Hering, Sitzgsber. d. Wiener Acad. 3. Abth. LXXIX. S. 149. 1879.

ches in der Mitte zwischen beiden wirklichen Augen gelegen ist. Wie ein solches Auge innervirt werden müsste um nach links, rechts, oben oder unten gewandt zu werden, oder sich für die grössere Nähe oder Ferne anzupassen, so werden die beiden wirklichen Augen innervirt, nur dass der letzteren Innervation beim imaginären Einauge lediglich eine innere Accommodation, bei den wirklichen Augen zugleich eine äussere Einstellung beider Gesichtslinien für die Nähe oder Ferne entspricht.

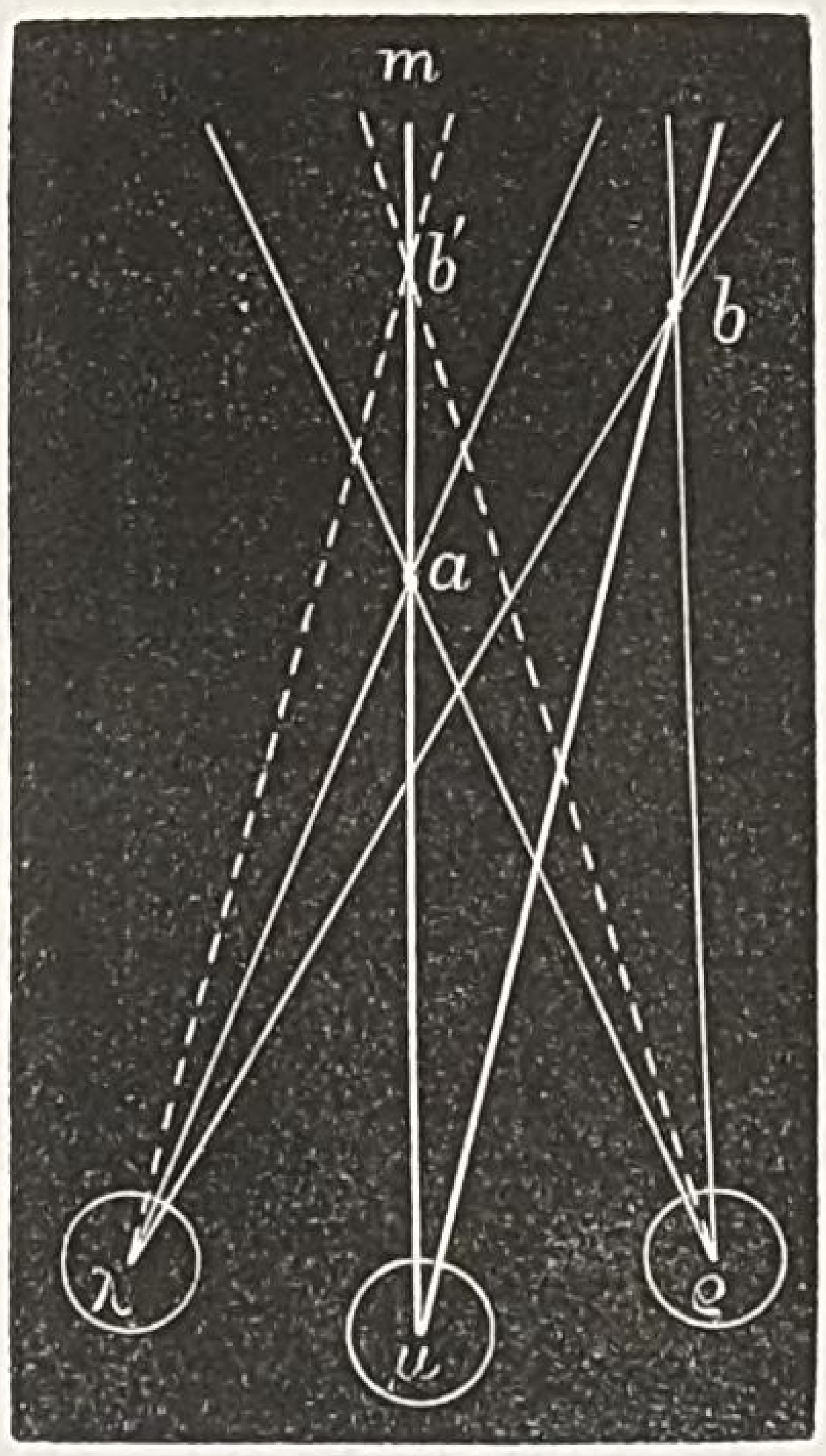


Fig. 54.

Der Blickpunkt liege in a (Fig. 54), und μm sei die Blicklinie des für die Nähe des Punktes a accommodirten imaginären Einauges, wobei der Accommodation desselben der Convergenzwinkel $\lambda a \varrho$ der wirklichen Gesichtslinien entspricht. Ein in b, also nach rechts und ferner als a gelegenes Object lenke jetzt die Aufmerksamkeit auf sich. Um es deutlich zu sehen, wäre für das imaginäre Einauge erstens eine Accommodation für grössere Ferne und zweitens eine Drehung nach rechts um den Winkel $m\mu b$ nöthig. Durch die Accommodation allein würde das imaginäre Auge etwa für den Punkt b' angepasst werden. Dieser Accommodation des imaginären Auges entspricht in der Wirklichkeit die Accommodation beider Augen und zugleich die Einstellung beider Gesichtslinien auf den Punkt b'. Der Drehung der Blicklinie des imaginären Auges um den Winkel $m\mu b$ entspricht an den wirklichen Augen eine Drehung beider Gesichtslinien um einen gleichgrossen Winkel; die bereits auf b' eingestellt gedachten Gesichtslinien würden sich also beziehungsweise um die Winkel $b'\lambda b$ und $b'\varrho b$ nach rechts drehen müssen. Diesen beiden Winkeln entspricht der gleich grosse Winkel $m\mu b$, um welchen sich die binoculare Blicklinie nach rechts wenden muss. Wie nun im imaginären Einauge die Accommodation und die Rechtswendung nicht nach einander, sondern mit einander vor sich gehen könnten, so erfolgen auch am wirklichen Doppelauge die analogen Veränderungen gleichzeitig. Das linke Auge bekommt dabei erstens einen Antrieb nach links, entsprechend der auf Minderung des Convergenzwinkels gerichteten Innervation des Doppelauges, und zweitens einen stärkeren Antrieb nach rechts, entsprechend der zum Zwecke der Rechtswendung des Doppelauges erfolgenden Innervation; seine Gesichtslinie geht deshalb im Sinne des stärkeren Antriebes um den Winkel $b'\lambda b - a\lambda b' = a\lambda b$ nach rechts. Die analogen Antriebe erhält auch das rechte Auge, bei welchem sie sich aber gegenseitig unterstützen, so dass daselbe um den Winkel $a\varrho b' + b'\varrho b = a\varrho b$ nach rechts gewandt wird.

Dass ein gewisser Zwang zu den beschriebenen Bewegungsassociationen vorhanden ist, geht aus folgenden Thatsachen hervor:

Wenn wir ein Auge verdecken, so folgt das verdeckte Auge den Bewegungen des andern, wovon man sich leicht an einer zweiten Person überzeugen kann, wenn man von der Seite her das nur lose verdeckte Auge beobachtet, oder auf das ganz geschlossene Auge die Fingerspitzen legt und so die Cornea tastet. Der Wille vermag nicht, diese für das Sehen ganz zwecklosen Mitbewegungen des gedeckten Auges zu unterdrücken.

Wenn ein Auge vollständig erblindet ist, begleitet es gleichwohl die Bewegungen des noch sehenden, und zwar ebenso bei Parallel- als bei Convergenzbewegungen. Wenn beide Augen vollständig erblindet sind, bewegen sie sich dennoch immer gleichzeitig. Bei einem „absolut blind Gebornen“ fand DONDERS [1] „parallele Augenbewegungen in allen Richtungen.“

Schielende, welche nachweisbar nur das Netzhautbild des einen Auges auffassen, bewegen gleichwohl beide Augen gemeinschaftlich.

Die unwillkürlichen Bewegungen beim Nystagmus erfolgen in beiden Augen gleichzeitig und in analoger Weise.

Bei Parese gewisser Augenmuskeln sind die Kranken, obwohl sie durch die Doppelbilder sehr belästigt werden, auch dann nicht im Stande beide Augen auf gewisse Aussenpunkte einzustellen, wenn sie bei einäugigem Sehen jedes Auge für sich auf jene Punkte einzustellen vermögen. Könnten sie jedes Auge unabhängig vom anderen innerviren, so müsste ihnen die gleichzeitige Einstellung beider Augen auf alle die Punkte möglich sein, auf die sie jedes Auge für sich einzustellen vermögen.

Diese Thatsachen beweisen, dass die associirten Innervationen und Bewegungen auch dann vorhanden sind, wenn sie das Sehen nicht fördern oder gar stören.

HERING hat aus dem Gesetze der gleichmässigen Innervation beider Augen, wie er es nennt, noch folgende Erscheinung erklärt: Wenn man Jemanden geradeaus und in die Ferne blicken lässt, dann z. B. in die linke Gesichtslinie 12—15 Ctm. vom Auge eine Nadelspitze hält, und nun den Blick auf diese richten lässt, so geräth das linke Auge während der Ueberführung des Blickpunktes in eine gewisse Unruhe, welche sich durch ein leichtes Hin- und Herzucken desselben verräth. Wären die Augen in ihren Bewegungen von einander unabhängig, so brauchte nur das rechte Auge innervirt zu werden, während das linke, dessen Gesichtslinie schon auf die Nadelspitze gerichtet ist, gar keine Innervation be-

1 DONDERS, Arch. f. d. ges. Physiol. XIII. S. 383. 1876.

dürfte. Steht aber dieses Auge bei dem Versuche unter dem Einflusse zweier gleichzeitiger antagonistischer Innervationen, welche sich während des Ablaufes der Blickbewegung nicht immer genau aufheben, so muss das Auge in ein leichtes Hin- und Herschwanken kommen, bis die richtige, so zu sagen neutrale Innervation eingetreten ist. Dasselbe Zucken zeigt sich, wenn man umgekehrt die Aufmerksamkeit und damit den Blick von der Nadelspitze wieder auf den Punkt richten lässt, der in der Ferne auf der linken Gesichtslinie liegt. Auch kann man den Versuch mit demselben Erfolge anstellen, während das andere Auge geschlossen ist: Nach längerer Uebung, oder wenn man ein Auge benützt, welches wie z. B. beim Mikroskopiren, oft in einseitiger Weise gebraucht worden ist, zeigt sich das Zucken nur schwach oder gar nicht. Sonst ist es immer sehr deutlich.

Mehrere schon im Capitel X. besprochene Thatsachen erläutern und bestätigen ebenfalls die gleichmässige Innervation beider Augen. Wenn in der S. 504 beschriebenen Weise das eine von zwei correspondirenden Netzhautbildern um das Netzhautcentrum etwas verdreht wird, so führen beide Augen eine kleine Rollung derart aus, dass beide Netzhautbilder wieder in die correspondirende Lage kommen, obwohl hierzu die alleinige Rollung des einen Auges genügen würde.

Bei gleicher Stellung einer Gesichtslinie hat, wie wir sahen, die Netzhaut eine verschiedene Lage, je nachdem der Blickpunkt auf derselben in der Ferne oder in der Nähe liegt. Denkt man sich bei einer gegebenen nahen Lage des Blickpunktes die Netzhäute zunächst so gestellt, wie es dem Listing'schen Gesetze entsprechen würde, so muss man sich weiter beide Augen etwas um die Gesichtslinie (das linke negativ das rechte positiv) gerollt denken, damit sie in diejenige Stellung kommen, welche sie bei der gegebenen Lage des nahen Blickpunktes wirklich haben. Ganz dieselbe Rollung tritt nun auch beim einäugigen Sehen ein. Betrachtet man z. B. mit dem linken Auge ein fernes Object, bringt dann in passender Nähe eine Nadelspitze in die Gesichtslinie und accommodirt auf dieselbe, so erfährt das linke Auge eine kleine negative Rollung, welche unverständlich wäre, wenn man nicht wüsste, dass beide Augen immer gleichzeitig innervirt werden, gleichviel ob sie beide am Sehacte theilnehmen oder nicht.

Bei dem beschriebenen Versuche erfährt das Auge, wie Hering [1]

1 Hering, l. c. S. 14.

fand, auch eine kleine unwillkürliche Ablenkung nach oben, während es von der Betrachtung des fernen zur Betrachtung des nähern übergeht; diese Ablenkung muss durch eine willkürliche Gegeninnervation ausgeglichen werden, was sich durch eine kleine Scheinbewegung des fixirten Punktes verräth (vergl. hierüber S. 541).

Mit der Convergenz associirt sich die Accommodation für die Nähe und die Verengerung der Pupille, so dass, wenigstens bei Emmetropen, der Refractionszustand der Augen immer der Entfernung des binocularen Blickpunktes entspricht. Die zugehörigen Innervationen folgen, wie schon v. Gräfe betonte, ebenfalls dem Gesetze der gleichmässigen Innervation und wir sind daher nicht im Stande, beiden Augen eine verschiedene Accommodation zu ertheilen, und zwar auch dann nicht, wenn Verhältnisse gegeben sind, unter denen eine ungleiche Accommodation zweckmässig wäre. „Wir sind“ sagt Donders [1] „nicht in der Lage, selbst eine geringe Differenz in der Refraction durch Accommodation auszugleichen, wenn letztere in beiden Augen die gleiche Breite hat; so unzertrennlich ist die Accommodationsspannung des einen Auges mit der des anderen verbunden.“ Jemand, der gleiche Augen hat, kann sich nach Donders leicht von dem Gesagten überzeugen, wenn er ein schwach negatives oder positives Glas vor das eine Auge hält, auf irgend ein Object sieht und dann abwechselnd das eine und das andere Auge verdeckt. Hering [2] hielt eine Nadel, welche er binocular fixirte, ganz nahe vors Gesicht und bewegte sie dann seitwärts, um ihren Abstand von beiden Augen möglichst verschieden zu machen. Dann spaltete er das einfache Nadelbild durch eine leichte Mehrung oder Minderung der Convergenz oder mittels eines Prismas, dessen Kante horizontal lag, in Doppelbilder und überzeugte sich von der Verschiedenheit der Schärfe der beiden Trugbilder. Es erschien dabei das Bild desjenigen Auges als das schärfere, welches den grösseren Abstand von der Nadel hatte. Schloss er dieses, so vermochte er gleichwohl mit dem anderen Auge die Nadel scharf zu sehen, Beweis, dass sie sich nicht ausserhalb des Accommodationsbereiches befand. In ganz ausführlicher Weise hat endlich Rumpf [3] gegenüber den Einwendungen von Kaiser [4], Schneller [5] und Woinow [6] bewiesen, dass die Innervation zur Accommodation eine gleichmässig bilaterale ist.

1 Donders, Anomal. d. Refr. u. Accomm. S. 471.
2 Hering l. c. S. 135.
3 Rumpf, Zur Lehre von d. binoc. Accommod. Inaug. Dissert. Heidelberg 1877. (Beilageheft zu den klin. Monatsbl f. Augenheilk. Aug. XV.)
4 Kaiser, Arch. f. Ophthalmologie XIII. (2) S. 366.
5 Schneller, ebendas. XVI. (1) S. 176.
6 Woinow, ebendas. XVI. (1) S. 209.

Die schon von E. H. Weber[1] untersuchte Frage, ob die Contraction der Pupille mit der Convergenz der Gesichtslinien oder mit der Accommodation associirt sei, beantwortet sich zunächst dahin, dass sie mit beiden zugleich associirt ist. Beim einäugigen Sehen bringt auch bei ungeänderter Stellung der entsprechenden Gesichtslinie die Accommodation für die Nähe eine Verengerung der Pupille mit sich, sei es dass man auf ein wirklich vorhandenes nahes Object accommodirt, sei es dass man, ohne den anfangs betrachteten fernen Punkt ausser Acht zu lassen, die Accommodation für die Nähe ohne nahes Object erzeugt, was man bei einiger Uebung leicht vermag. Diesen Versuch darf man aber nicht so deuten, als finde hier Accommodation oder Pupillenänderung ohne Aenderung der Convergenz statt; denn in Wirklichkeit ändert sich dabei auch die Stellung des geschlossenen Auges unter dem Lide, was der leise aufgelegte Finger bemerklich macht.

Der Zusammenhang zwischen einem bestimmten Convergenzgrade der Gesichtslinien und einer bestimmten Accommodation lässt sich wie unten erörtert wird, innerhalb gewisser engen Grenzen lösen. Dabei richtet sich, wie Plateau[2] fand, die Pupillenweite nicht nach der Convergenz sondern nach der Accommodation, woraus folgt, dass sie mit der ersteren fester associirt ist, als mit der letzteren. Vgl. hierüber auch Joh. Müller[3] und Donders[4].

Die reflectorische Verengerung oder Erweiterung der Pupillen infolge einseitiger oder doppelseitiger Mehrung oder Minderung des Lichtreizes geschieht ebenfalls stets beiderseits in gleicher Weise, und es folgt also die hierbei stattfindende reine Reflexinnervation einem analogen Gesetze wie die übrigen motorischen Innervationen des Doppelauges. Donders[5] zeigte, dass beide Pupillen sich streng gleichzeitig verengen, wenn auch nur in einem Auge das einfallende Licht vermehrt wird. Er setzte vor beide Augen Convexgläser so, dass das eine etwas höher lag als das andere, und blickte dann nach einem entfernten Lichtpunkte. Er sah nun denselben in zwei übereinander liegenden Zerstreuungskreisen, deren Grösse von der Grösse der Pupille abhing, und konnte so die Veränderungen der Pupillenweite controliren. Hering[6] kam mit einer abgeänderten Methode zu demselben Ergebniss. Fixirt man den Kopf, bringt dicht vor jedem Auge einen kleinen feststehenden Schirm mit einem feinen Loche an und stellt dann seine Gesichtslinien so ein, dass jede durch das Loch des Schirmes der betreffenden Seite hindurchgeht, so ver-

1 Weber,
2 Plateau, l'Institut 1835. S. 103.
3 Donders l. c. S. 484.
4 Joh. Müller, Handb. d. Physiol. II. S. 237.
5 Donders l. c. S. 483.
6 Hering l. c. S. 134.

schmelzen die Bilder der beiden Zerstreuungskreise zu einem einzigen. Hat man durch den einen Schirm dicht oberhalb, durch den andern dicht unterhalb des ersten Loches ein zweites feines Loch gestochen, so erhält man bei binocularer Verschmelzung der beiden ersten Löcher drei Bilder als drei kleine übereinander liegende Scheiben, von welchen die mittlere binocular, die obere und die untere nur von je einem Auge gesehen werden. Man kann es nun leicht so einrichten, dass die obere und die untere Scheibe genau gleich gross erscheinen. In den einen Schirm ist ferner auswärts von den beiden feinen Löchern ein grösseres Fenster geschnitten, welches zunächst durch einen Deckel geschlossen ist. Oeffnet man dasselbe plötzlich, so dass eine hinreichende Lichtmenge auf die periphere Netzhaut des einen Auges fallen kann, so sieht man den obern und den untern Zerstreuungskreis sich gleichzeitig verkleinern.

Das Bestehen der beschriebenen Associationen schliesst nicht aus, dass unter bestimmten Umständen die betheiligten Muskeln auch eine mehr oder weniger selbstständige Innervation erfahren können, wie dies fast von allen Associationen gilt, welche im Bereiche des dem Willen unterworfenen motorischen Apparates vorkommen. Schon oben S. 507 haben wir die im Interesse der Correspondenz erfolgende einseitige Hebung oder Senkung eines Auges besprochen, Bewegungen, welche sich von den gewöhnlichen Augenbewegungen auch dadurch unterscheiden, dass sie nicht durch einen Ortwechsel der Aufmerksamkeit, sondern nur durch das Streben nach deutlicherer Wahrnung eingeleitet werden.

Ferner ist es, wie PLATEAU[1] fand, möglich, bei unveränderter Convergenz der Gesichtslinien die Accommodation innerhalb gewisser Grenzen zu ändern (relative Accommodationsbreite). Wenn man, wie DONDERS[2] that, eine schwache Convex- oder Concavbrille aufsetzt und Dinge betrachtet die in mittler Blickweite liegen, so sieht man dieselben anfangs undeutlich, weil jetzt der durch die Brille veränderte Refractionszustand des optischen Apparates nicht mehr der Entfernung des Blickpunkts entspricht; nach einiger Zeit aber ändern die Augen ihren Accommodationszustand und gleichen dadurch den durch die Brille eingeführten Fehler aus, womit aber ein Gefühl von Anstrengung verbunden ist, so lange man sich noch nicht an die Brille gewöhnt hat. Wählt man von vornherein zu starke Gläser, so bleibt nur die Alternative, entweder einfach und sehr undeutlich, oder zwar deutlich aber doppelt zu sehen.

Setzt man nach dem Vorgang von DONDERS vor beide Augen je ein schwaches Prisma mit verticaler Kante, so muss man, um z. B.

1 PLATEAU, l'Institut 1835. S. 103.
2 DONDERS, Holl. Beiträge I. S. 379. 1846.

Dinge in mittler Blickweite einfach zu sehen, je nachdem die brechende Kante nach aussen oder innen liegt, die Convergenz der Gesichtslinien mehren oder mindern. Da sich mit dieser Convergenzänderung eine, hier ganz unzweckmässige Aenderung der Accommodation verbindet, so sieht man zunächst undeutlich. Aber auch hier tritt bei schwachen Prismen eine Correction dadurch ein, dass die Accommodation allmählich wieder nahezu auf das frühere Maass zurückkehrt.

Bei haploskopischen Versuchen kann man durch Veränderung der Entfernung der Bilder vom Kopfe oder der Distanz der Bilder untereinander ebenfalls alle möglichen Grade der Disharmonie zwischen den Augenstellungen und der Entfernung der Gesichtsobjecte herbeiführen und sich überzeugen, dass mässige Störungen durch Aenderung der Accommodation corrigirt werden. Schliesslich wird es nach längerer Uebung in dergleichen Versuchen möglich, ohne alle besondere Veranstaltungen bei unveränderter Fixirung eines beliebig entfernten Objects die Accommodation etwas zu ändern.

Zahlreiche Messungen der bei bestimmten Convergenzen der Gesichtslinien möglichen Accommodationsänderungen verdanken wir DONDERS [1].

Die Association der Augenbewegungen betrachtete JOH. MÜLLER [2] als angeboren. Den directen Beweis für die Richtigkeit dieser Ansicht betreffs der Parallelbewegungen liefern nach HERING's [3] Ansicht die Neugebornen. Da die cerebrale oder psychische Reife derselben eine sehr verschiedene ist, so muss man zur Beobachtung solche Neugeborne wählen, deren Schlaf durch längere Perioden einer ganz spontanen Munterkeit unterbrochen ist, wobei sie die Augen durch längere Zeit hinreichend offen halten. Man überzeugt sich dann leicht, dass die Augen vorherrschend Parallelbewegungen ausführen, während bei den Bewegungen andrer Theile und insbesondere den mimischen Bewegungen die symmetrische Association deutlich ausgeprägt ist. Man findet ferner auch die Association zwischen der Hebung der Augen, der Lider und des Kopfes, sowie die Association zwischen Seitwärtswendung der Augen und des Kopfes schon deutlich ausgesprochen. Seltner zeigen sich die symmetrischen Bewegungen der Augen (Convergenz- und relative oder schwache absolute Divergenzbewegungen).

Für den angebornen Zusammenhang zwischen Convergenz und

1 DONDERS, Anomal. d. Refract. u. Accommod. S. 93.
2 JOH. MÜLLER, Handb. d. Physiol. II. S. 103. 1840.
3 HERING, Die Lehre vom binocularen Sehen § 6.

Accommodation hat DONDERS die Thatsache angeführt, dass bei hypermetropischen Kindern sich häufig convergirendes Schielen entwickelt.

Die oben erörterten Ausnahmen von der gewöhnlichen Association sind von HELMHOLTZ [1] als Beweis dafür angesehen worden, dass letztere nicht auf angebornen organischen Einrichtungen beruhe. Indessen ist von fast allen angebornen Associationen im Gebiete der willkürlichen Muskulatur bekannt, dass sie eine mehr oder minder grosse Unabhängigkeit der dabei betheiligten Einzelapparate nicht ausschliessen.

Die Angaben HERING's über die associirten Augenbewegungen der Neugebornen sind von RAEHLMANN und WITKOWSKY [2], welche 40 Kinder in den ersten zehn Lebenstagen untersuchten, in allen wesentlichen Punkten bestätigt worden. Sie kamen ebenfalls zu dem Ergebnisse, dass „die meisten Augenbewegungen der neugebornen Kinder scheinbar associirte Seitenbewegungen sind“. Die Convergenz- und Divergenzbewegungen, welche zwischendurch beobachtet wurden, fassen die Genannten als nicht coordinirte Bewegungen auf. Ausserdem aber constatirten sie „oft“ Höhenabweichungen, über deren Grösse sie nichts angaben, und „bisweilen“ vollkommen einseitige Bewegungen, welche von den einseitigen Bewegungen, wie sie von den Genannten an Schlafenden beobachtet wurden, bisweilen gar nicht, bisweilen durch ihre grössere Raschheit verschieden waren. Dass RAEHLMANN und WITKOWSKY, wie auch SCHOELER [3], nicht coordinirte Augenbewegungen oft beobachteten, erklärt sich wohl daraus, dass sie Neugeborne ohne Auswahl untersuchten. Viele derselben kommen aus ihrem schläfrigen Zustande eigentlich nie recht heraus und führen noch tagelang eine Art Fötalleben. Im Schlafe aber kommen, wie RAEHLMANN und WITKOWSKY fanden, auch bei älteren Kindern und bei Erwachsenen nicht coordinirte, „atypische“ Augenbewegungen vor.

Die Frage, ob und inwieweit die Association der Augenbewegungen angeboren ist, darf nicht, wie es geschehen ist, vermengt werden mit der ganz andern Frage, ob Neugeborne schon binocular oder überhaupt fixiren. SCHOELER, sowie RAEHLMANN und WITKOWSKY haben übereinstimmend mit früheren Beobachtern gesehen, dass die Kinder in den ersten Tagen nach der Geburt selbst Flammen und andere helle Dinge nicht fixiren. Dasselbe hatte auch HERING [4] angegeben. Die Angaben der verschiedenen Autoren über die Zeit, zu welcher die ersten deutlichen Zeichen des Fixirens auftreten, sind sehr verschieden und schwanken zwischen wenigen Tagen und mehreren Wochen. [5] Hierbei kommt offenbar die schon oben betonte grosse Verschiedenheit der psychischen Reife der Neugebornen sehr in Betracht. Hat doch DONDERS [6] mit ENGELMANN „binoculare Fixation mit Veränderung der Convergenz bei einem männlichen Kinde kaum eine Stunde nach der Geburt“ wahrgenommen,

1 HELMHOLTZ, Physiol. Optik S. 472.
2 RAEHLMANN und WITKOWSKY, Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1877. S. 454.
3 SCHOELER, Arch. f. Ophthalmologie XIX. (1) S. 41. 1873.
4 HERING l. c. S. 21.
5 Vergl. RAEHLMANN u. WITKOWSKY l. c.
6 DONDERS, Arch. f. d. ges. Physiol. XIII. S. 383. 1876.

was, wie er hinzufügt, „sicher eine Ausnahme“ war, ja sogar ein Kind beobachtet[1], welches „wenige Minuten nach der Geburt einen vorgehaltenen Gegenstand sehr bestimmt binocular fixirte und nicht allein demselben bei seitlichen Bewegungen folgte, sondern auch bei Annäherung die Convergenz vermehrte, bei Entfernung des Gegenstandes verringerte.“

Der Thatsache, dass dem von räumlichen Wahrnehmungen oder Vorstellungen geleiteten Willen gegenüber sich die beiden Augen wie ein einfaches Organ verhalten, entspricht die im I. Capitel erörterte Correspondenz der Netzhäute, der zu Folge sich in Bezug auf die identischen Breiten- und Höhenwerthe und die dadurch bedingten einfachen Sehrichtungen beide Augen ebenfalls wie ein einfaches Organ verhalten. Die sensorische Correspondenz der Netzhäute hat ihr motorisches Correlat in der durch die Association bedingten Correspondenz der Bewegungen.[2] Dafür, dass diese zweifache Correspondenz in den Functionen beider Augen auf angeborener organischer Grundlage ruht, lassen sich mancherlei Erfahrungen aus der Anatomie und Pathologie anführen. Betreffs der Correspondenz der Netzhäute gehört hierher das Vorkommen partieller, auf beiden Netzhäuten correspondirend localisirter Lähmungen, insbesondere der doppelseitigen Hemiopie, welche letztere sich nach Munk's[3] Angaben auch experimentell an Affen erzeugen lässt; ferner die partielle Kreuzung der Fasern im Chiasma nerv. opt., für welche insbesondere Gudden[4] neuerdings zahlreiche Thatsachen beigebracht hat. Während bei gewissen Thieren, denen wir nach der Lagerung ihrer Augen zwei völlig getrennte Gesichtsfelder zuschreiben müssen, die Sehnerven vollständig gekreuzt sind, ist beim Menschen und bei einer Anzahl von Thieren, deren Gesichtsfelder sich theilweise decken, diese Kreuzung unvollständig gefunden worden, derart, dass nicht alle Fasern jedes Tractus opticus zum Auge der entgegengesetzten Seite verlaufen, sondern ein Theil im Chiasma zum Auge derselben Seite abschwenkt.

Betreffs einer organischen Grundlage für die Association der Bewegungen sind, abgesehen von den in der Physiologie der Grosshirnrinde erwähnten Thatsachen, besonders Adamük's[5] Versuche an Hunden zu erwähnen, welche ebenfalls ergaben, dass die bei natür-

1 Donders, Arch. f. Ophthalmologie XVII. (2) S. 34. 1871.

2 Nach einer von Hering (Beiträge zur Physiol. V. § 124) kurz angedeuteten Theorie entspricht ebenso der symmetrisch associirten Innervation bei Näherung und Fernerung des Blickpunktes eine symmetrische Vertheilung der Tiefenwerthe auf der Doppelnetzhaut.

3 Vergl. dieses Handb. II. 2. Abth. S. 326.

4 Gudden, Arch. f. Ophthalmologie XX. (2) S. 249. XXI. (3) S. 199. XXV. (1) S. 1.

5 Adamük, Centralbl. f. d. med. Wiss. 1870. Nr. 5. S. 66.

licher Innervation associirten Muskeln auch durch künstliche centrale Reizung aus einem Punkte des Gehirns in associirte Thätigkeit versetzt werden können, Thatsachen, die zwar eine verschiedene Deutung zulassen, aber jedenfalls sehr nahe legen, dass die Association der Augenbewegungen, um mit Aubert[1] zu sprechen, „auf anatomischer Gruppirung der Nervenelemente und auf einem anatomisch gegebenen Mechanismus beruht."

Adamük reizte mit dicht bei einander stehenden Electroden durch Inductionsschläge die Vorderhügel der Corpora quadrigemina. Bei Reizung des rechten Vorderhügels erhielt er Bewegungen beider Augen nach links, bei Reizung des linken Bewegungen beider Augen nach rechts. „Durch die Reizung der verschiedenen Punkte jedes Hügels kann man, sagt Adamük, mannichfaltige Bewegungen hervorrufen, aber immer mit beiden Augen zu gleicher Zeit und in derselben Richtung. Wird länger gereizt, so dreht sich auch der Kopf nach derselben Seite, wie die Augen. Wenn durch eine tiefe Incision die beiden Hügel getrennt sind, beschränkt sich die Bewegung nur auf die Seite der Reizung." Bei allen diesen Bewegungen bleibt die Pupille unverändert. Reizt man in der Mitte zwischen den Vorderhügeln, so erhält man symmetrische Bewegungen und zwar stellen sich die im Ruhestande nach unten convergirenden Augen parallel, wenn man nach vorn reizt. Weiter nach hinten gibt die Reizung Bewegung beider Augen nach oben mit Erweiterung der Pupille, noch weiter nach hinten Convergenz nach oben. Wenn man „den hinteren untern Theil der vorderen Hügel reizt", so zeigt sich starke Convergenz nach unten mit Verengerung der Pupille. Donders[2], in dessen Laboratorium Adamük arbeitete, bestätigt diese Ergebnisse.

ZWÖLFTES CAPITEL.

Die Localisirung bei bewegtem Blicke.

Wir haben, wie aus den Darlegungen der beiden letzten Capitel hervorgeht, zwei Classen von Augenbewegungen zu unterscheiden. Die eine umfasst die eigentlichen Blickbewegungen, durch welche die Ortsveränderungen des Blickpunktes bewirkt werden; sie sind eine Folge davon, dass die Aufmerksamkeit ihren Ort im Raume wechselt, und werden also lediglich durch räumliche Wahrnehmungen

1 Aubert, Handb. d. gesammt. Augenheilk. II. (2) S. 668.
2 Donders, Arch. f. Ophthalmologie XVIII. (2) S. 153. 1872.

oder Vorstellungen veranlasst und geleitet. Die andere Classe umfasst diejenigen Bewegungen, welche, während die Aufmerksamkeit auf demselben Orte ruhen bleibt, durch den Drang zur deutlicheren Wahrnehmung des Gegenstandes herbeigeführt werden. Hierher gehören z. B. die auf S. 506 beschriebenen Bewegungen, mittels welcher eine durch Prismen oder sonstwie herbeigeführte allgemeine Längsdisparation der beiden Netzhautbilder beseitigt wird, ebenso die Rollungen der Augen, durch welche die gestörte Correspondenz der beiderseitigen Bildlagen wiederhergestellt wird (S. 504); ferner die Accommodationsbewegungen, welche bei unveränderter Lage des Blickpunktes dann eintreten können, wenn die gewohnte Harmonie zwischen Convergenzgrad und Entfernung des betrachteten Gegenstandes irgendwie gestört worden ist (S. 527).

Wir könnten diese zweite Classe von Bewegungen als die Correctivbewegungen bezeichnen, weil sie sämmtlich dazu dienen, die Störung der gewohnten Leistungsfähigkeit des Gesichtsorganes durch äussere oder innere Bewegungen der Augen zu corrigiren. Im Folgenden beschäftigen wir uns nur mit den eigentlichen Blickbewegungen.

I. Die Localisirung bei Blickbewegungen nach den Dimensionen der Breite und Höhe.

Im I. Capitel haben wir jedem einzelnen Deckpunktpaare und entsprechend der von ihm ausgelösten Empfindung einen bestimmten positiven oder negativen Höhen- und Breitenwerth in Bezug auf die Netzhautmitte und auf den Kernpunkt des Sehfeldes zugeschrieben, welche Raumwerthe wir als die relativen Raumwerthe bezeichnen wollen. Dabei hielten wir uns jedoch nur an die Localisirung bei ruhendem Blicke. Für die Localisirung bei bewegtem Blicke ergibt sich nun zuvörderst der Satz, dass durch die Bewegung an sich und wenn nicht durch dieselbe anderweite Erfahrungsmotive der Localisirung in Wirksamkeit gesetzt werden (vergl. Cap. XIII), die relativen Raumwerthe der Netzhautstellen und der zugehörigen Empfindungen nicht geändert werden, dass aber die absoluten, d. h. die auf den wirklichen Raum [1] bezogenen Raumwerthe sich ändern und

1 Streng genommen sind die Raumwerthe, welche wir hier als die absoluten bezeichnen, nicht auf den wirklichen Raum d. h. auf die durch Urtheil und Schluss gewonnene Vorstellung von den drei Hauptebenen zu beziehen, sondern auf die Hauptebenen eines Raumes, den wir als den Fühlraum bezeichnen möchten, dessen Lage hauptsächlich durch die sogenannten Gleichgewichtsgefühle bestimmt wird und uns unmittelbar, nicht erst durch Reflexionen bewusst ist. Wir sind aber schon in der Einleitung der Einfachheit wegen von der Annahme ausgegangen, dass unsre Vorstellung (unser Gefühl) von der Lage der Hauptebenen des

zwar alle in gleichem Sinne und Maasse. Die geänderte Lage der Hauptsehrichtung bedingt also eine entsprechende Lageänderung des ganzen Systems der Sehrichtungen, ohne dass dieses in sich eine Aenderung erfährt; mit der Ortsänderung des Kernpunktes verbindet sich eine Ortsänderung des ganzen Complexes der Gesichtsempfindungen, welchen wir als Sehfeld oder Sehraum bezeichnet haben, aber die relative Lage der einzelnen Empfindungen dieses Complexes d. i. die Anordnung der Sehdinge im Sehraum gehorcht nach wie vor denselben Gesetzen, wie bei ruhendem Blicke.

Da sich nämlich bei jeder Blickbewegung die Bilder der Aussendinge auf der Netzhaut verschieben und somit ihre relativen Raumwerthe ändern, wir die Dinge aber dabei gleichwohl im Allgemeinen in Ruhe sehen, so folgt, dass die durch die Bildverschiebung bedingte Aenderung der relativen Raumwerthe compensirt wird durch die bei der Blickbewegung stattfindende Aenderung des absoluten Raumwerthes des ganzen Empfindungscomplexes oder des Sehraumes und damit jeder Einzelempfindung oder jedes Sehdinges, und dass also beide Aenderungen gleich gross aber entgegengesetzt sind. Wäre dies nicht der Fall, so müssten die Dinge während der Bewegung des Blickes ihre scheinbare Lage ändern, es müssten Scheinbewegungen und Aenderungen der scheinbaren Gestalt auftreten. Solche zeigen sich, wie wir sehen werden, wirklich in allen Fällen, wo die Aenderung der absoluten Raumwerthe die Aenderung der relativen nicht genau oder gar nicht compensirt.

Die Aenderung der absoluten Raumwerthe kann ebensowohl die auf die Hauptebenen des Raumes bezogenen Breiten- und Höhenwerthe als auch die Tiefenwerthe der von der Doppelnetzhaut ausgelösten Empfindungen im positiven oder negativen Sinne betreffen.

Dagegen ist bis jetzt kein sicherer Fall bekannt, in welchem lediglich durch Blickbewegungen die absoluten Raumwerthe der Netzhautstellen derart geändert würden, wie die relativen Raumwerthe der Netzhautbilder der Aussendinge bei Rollung des Auges um die feststehende Gesichtslinie. Wohl aber findet eine solche Aenderung der absoluten Raumwerthe statt und es wird gleichsam die Axe der Polarcoordinaten für die Raumwerthe verändert, wenn wir den Kopf zur Seite neigen, was beim gewöhnlichen Sehen nicht vorkommt.

In wieweit wir bei primärer Stellung des Kopfes und der bino-

Raumes eine richtige sei, was heissen soll, dass die Hauptebenen des Fühlraumes mit denen des gedachten Raumes oder Denkraumes zusammenfallen. Dies ist freilich nicht immer der Fall, wie u. A. die Experimente MACH's über die Bewegungsempfindungen zur Genüge lehren (vergl. MACH, Die Lehre von den Bewegungsempfind. Leipzig 1875).

cularen Blicklinie richtig localisiren, haben wir im VII. Capitel erörtert; entsprechend werden wir auch bei bewegtem Blicke und bei jeder anderen Lage der binocularen Blicklinie localisiren, falls wirklich die dadurch geänderte Lage der Bilder auf unserer Netzhaut durch die Aenderung der absoluten Raumwerthe genau ausgeglichen wird. Es wäre also zu untersuchen, innerhalb welcher Grenzen letzteres der Fall ist. Man hat sich jedoch seither mit der Thatsache der annähernd richtigen Localisirung bei bewegtem Blicke begnügt und eingehendere Untersuchungen nicht angestellt. Es liegen uns daher nur vereinzelte hierhergehörige Thatsachen vor.

Das erste Erforderniss für die richtige Localisirung würde sein, dass die durch die Aenderung der absoluten Raumwerthe bedingte Ortsveränderung des Kernpunktes genau die gleiche wäre, wie die Ortsveränderung des Blickpunktes; das zweite wäre, dass die Sehdinge nicht nur im Sehraume dieselbe relative Lage zu einander hätten, wie die wirklichen Dinge im wirklichen Raume, soweit dies nach den Auseinandersetzungen des VII. Capitels überhaupt denkbar ist, sondern dass auch ihre absolute, d. h. die auf die Hauptebenen des wirklichen Raumes bezogene Lage dieselbe wäre.

Die Bewegungen des Blickpunktes werden veranlasst und geleitet durch Ortsveränderungen der Aufmerksamkeit. Zieht ein zunächst indirect gesehenes Object die Aufmerksamkeit auf sich, so wird durch diesen Ortwechsel der Aufmerksamkeit und das Streben, das Object deutlich zu sehen, die entsprechende Blickbewegung ohne unser weiteres Zuthun ausgelöst. Die Wanderung der Aufmerksamkeit setzt die Wanderung des Blickpunktes. Ehe also noch die Blickbewegung beginnt, ist der Ort, der das Ziel derselben bildet, bereits im Bewusstsein und von der Aufmerksamkeit erfasst, und die Lage dieses Ortes im Sehraume bestimmt die Richtung und Grösse der Blickbewegung. In demselben Maasse aber als die Aufmerksamkeit ihren Ort im Raume ändert, ändern sich zugleich auch die absoluten Raumwerthe der Netzhaut und es wird die Richtung und Grösse dieser Aenderung lediglich durch die Richtung und Grösse des Abstands bedingt, welchen der jeweilige neue Aufmerksamkeitsort in Bezug auf den alten hat.

Dass die Aenderung der absoluten Raumwerthe in der That allein von dem Ortswechsel der Aufmerksamkeit, nicht aber erst nachträglich von der dadurch ausgelösten Blickbewegung bedingt ist, wird dadurch bewiesen, dass erstere auch dann eintritt, wenn letztere anomaler Weise ausbleibt. Ist z. B. der äussere Gerade des rechten Auges gelähmt und der Kranke schliesst das linke Auge, so

scheint sich ihm alles Sichtbare nach rechts zu bewegen; er unterliegt dem sogenannten Gesichtsschwindel. Sobald sich nämlich seine Aufmerksamkeit nach rechts wendet, erfahren alle Breitenwerthe der Netzhaut einen entsprechenden positiven Zuwachs, und er localisirt, da wegen der Lähmung das Auge und seine Netzhautbilder ihre Lage nicht verändern, die Sehdinge in demselben Maasse weiter nach rechts, als der Aufmerksamkeitsort nach rechts gewandert ist.

Ebenso treten Scheinbewegungen der Aussendinge ein, wenn die Augen sich bewegen, ohne dass doch der Aufmerksamkeitsort sich geändert hat. Solche anomale, nicht durch den Ortwechsel der Aufmerksamkeit, sondern durch andere unbewusste Vorgänge ausgelöste Bewegungen treten z. B. ein, wenn man sich mehrere Male rasch um sich selbst gedreht hat und dann plötzlich stehen bleibt. Körper und Augen setzen dann die Drehung in der Richtung der vorangegangenen Körperdrehung fort, es werden dadurch die Netzhautbilder verschoben, und da diese Verschiebung der Bilder hier nicht durch Aenderung der absoluten Raumwerthe compensirt wird, so scheinen sich die Dinge entsprechend der Bildverschiebung in derjenigen Richtung zu verschieben, welche der Richtung der Augendrehung entgegengesetzt ist (PURKINJE's Gesichtsschwindel). Dass dabei die starke unwillkürliche Nachdrehung der Augen, und nicht die viel geringere Nachdrehung des Körpers die Verschiebung der Netzhautbilder im Wesentlichen bedingt, kann man leicht mit Hülfe eines zuvor erzeugten dauerhaften Nachbildes beweisen.[1]

In analoger Weise führen auch alle passiven, nicht durch Muskelcontraction bewirkten Augenbewegungen, wie man sie z. B. durch seitlichen Fingerdruck auf den Augapfel herbeiführen kann, zu entsprechender Scheinbewegung der sichtbaren Dinge.

Abgesehen also davon, dass durch die jeweilige Augenstellung die Lage der Bilder auf der Netzhaut mit bestimmt wird, haben die Stellungen und Bewegungen der Augen an sich keinen Einfluss auf die Localisirung, und nur insoweit, als sie Ausdruck der jeweiligen Localisirung der Aufmerksamkeit und des dadurch bedingten absoluten Raumwerthes der Netzhautstellen sind, beeinflussen sie scheinbar die Localisirung. Wie sich dies in den oben angeführten Fällen in sehr auffälliger und schlagender Weise offenbart, so zeigt es sich auch in geringerem Grade bei zahlreichen anderen Gelegenheiten.

Bewegt sich z. B. die Gesichtslinie bei fixirtem Kopfe in secun-

1 HERING, Beiträge zur Physiologie I. S. 31. 1861.

dären ebenen Bahnen, so erfährt dabei das Auge, wie S. 487 erörtert wurde, zugleich eine Rollung um die Gesichtslinie. Lassen wir also z. B. den Blick entlang einer erheblich über der primären Blickebene gelegnen Horizontalen hingleiten, so wandert die Aufmerksamkeit horizontal nach rechts oder links, und es erfahren die Breitenwerthe der Netzhaut den entsprechenden positiven Zuwachs. Die Netzhautbilder der einzelnen Linienpunkte aber ändern in Folge ihrer Verschiebung nicht blos ihre relativen Breitenwerthe im entgegengesetzten Sinne und Maasse, welchenfalls sie ja doch immer auf demselben Netzhautmeridian bleiben würden, sondern sie verlassen diesen Meridian in Folge der Rollungen und ändern daher zugleich ihre Höhenwerthe um ein Geringes. Die Folge ist, dass die Linie ihre scheinbare Lage ändert; wandert der Blick nach rechts, so dreht sie sich scheinbar im positiven, wandert er nach links, im negativen Sinne. Lässt man den Blick rasch entlang der Linie hingleiten, wobei man nicht Zeit hat, auf die ganze Linie zu achten, sondern nur das in der Nähe des Blickpunktes liegende Stück auffasst, so resultirt aus den raschen scheinbaren Richtungsänderungen der Linie das Bild einer gekrümmten, nach unten concaven Linie, eine Beobachtung, welche zuerst Helmholtz [1] gemacht hat. Analoges gilt von allen geraden Linien, welche in secundären Blickbahnen gelegen sind; sie erscheinen unter den genannten Umständen stets concav nach dem Orte des primären Blickpunktes.

Man darf bei dem beschriebenen Versuche die horizontale Linie nicht mit allzu stark gehobenem Blicke betrachten, weil sonst die Täuschung durch eine andere mehr oder weniger compensirt wird. Will man nämlich den stark gehobenen Blick horizontal nach rechts oder links wenden, so weicht die Gesichtslinie, je näher sie dem rechten oder linken obern Winkel der Orbita kommt, mehr und mehr nach unten ab, weil die Bewegung einen Widerstand findet, der im engern Blickfelde nicht vorhanden ist. In Folge dessen kommt die Linie über den Blickpunkt zu liegen und die Aufmerksamkeit muss etwas ansteigen, wodurch eine Innervation zu stärkerer Hebung des Auges ausgelöst und der Blickpunkt wieder auf die Linie gebracht, beziehungsweise auf derselben erhalten wird. Dementsprechend würde die Linie, wenn keine gleichzeitige Rollung stattfände, nach rechts und links ansteigend und also nach o b e n concav erscheinen.

Wenn, wie wir sahen, bei raschem Hingleiten des Blickes auf einer in secundärer Blickbahn gelegenen Geraden dieselbe concav nach dem primären Blickpunkte erscheint, so ist zu erwarten, dass umgekehrt eine nach dem primären Blickpunkte hin convexe Linie

1 Helmholtz, Physiol. Optik. S. 551.

von entsprechender Krümmung unter den genannten Umständen gerade erscheinen wird. Küster [1] hat angegeben, dass Reihen leuchtender Punkte im Dunkelraume, welche annähernd [2] in den S. 492 erörterten Richtkreisen eines kugligen Gesichtsfeldes liegen, ihm zwar gekrümmt erschienen, wenn er einen Punkt derselben bei der zugehörigen Secundärstellung des Auges fixirte, aber geradlinig, wenn er den Blick die Linie entlang gleiten liess. Dies setzt natürlich voraus, dass die Blickbewegung hinreichend rasch geschieht und dass man immer nur die dem Blickpunkte näheren Punkte der Reihe betrachtet. Denn nimmt man sich Zeit, die ganze Reihe zu beachten, so wird man sie nothwendig krumm sehen, wie sie ist.

Für ein Auge, dessen Drehpunkt sich in der Entfernung *ee* senkrecht über dem Mittelpunkte der Fig. 55 befände, würden die hyper-

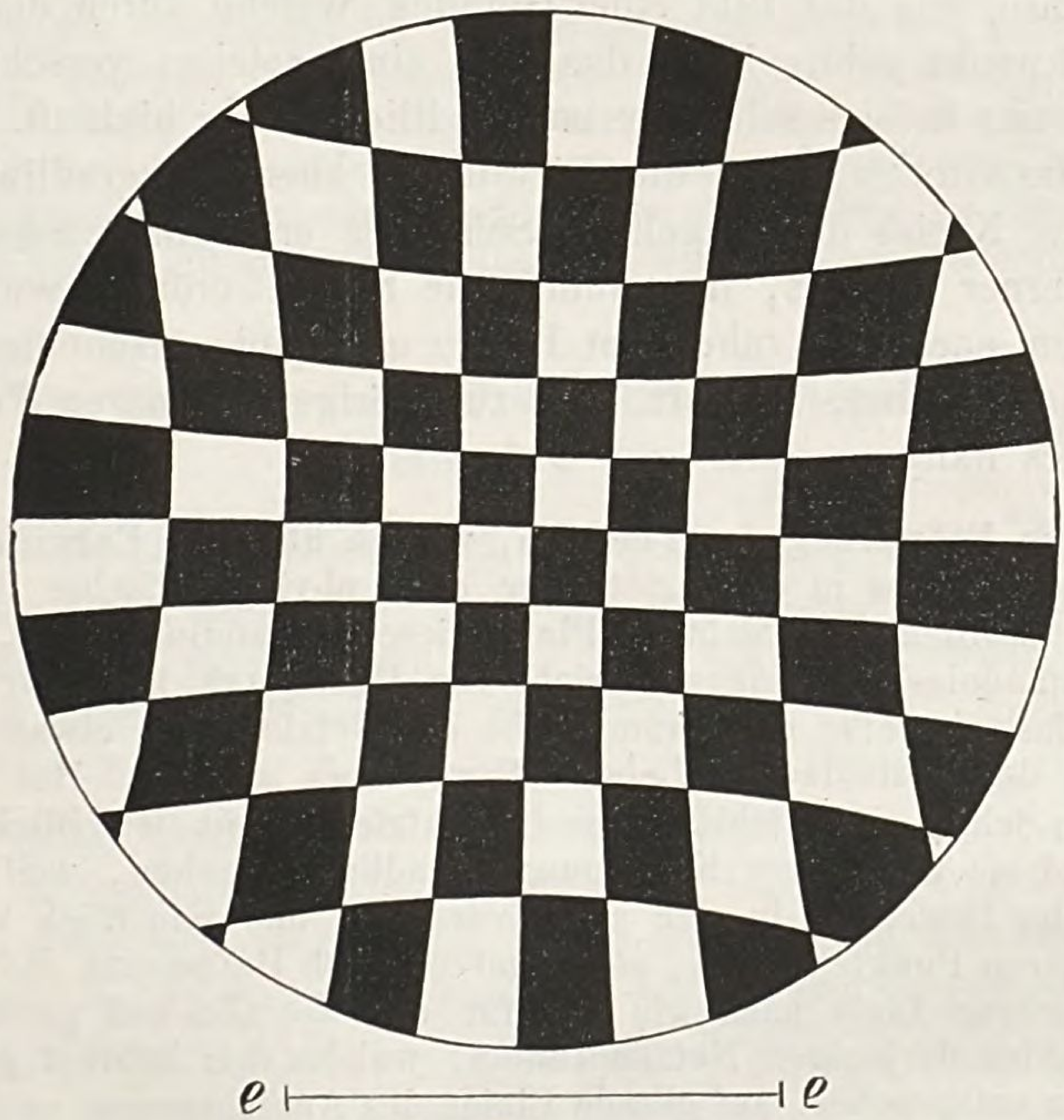


Fig. 55 (nach Helmholtz).

bolischen Grenzlinien der schwarzen und weissen Felder die von Helmholtz sogenannten Richtlinien des Sehfeldes darstellen. Betrachtete Helmholtz in dieser Weise mit bewegtem Blicke eine solche in vergrössertem Maassstabe gezeichnete Figur aus einer entsprechend

1 Küster, Arch. f. Ophthalmologie XXII. (1) S. 149. 1876.
2 Vergl. die Anmerk. 3 auf S. 370.

vergrösserten Entfernung, so sah er die hyperbolischen Linien zwar nicht geradlinig, wohl aber erschien ihm die Figur nicht eben, sondern als eine kuglig-concave Fläche, auf welcher sich die Linien als grösste Kreise darstellten. Nach den im Sehfelde selbst gelegenen Richtungen erschienen die Hyperbeln nicht gekrümmt, nur das Sehfeld selbst erschien so.

Das Netzhautbild eines Richtkreises oder einer Richtlinie hat, wie aus den S. 494 gemachten Erörterungen folgt, die Eigenthümlichkeit, dass es sich nur in sich selbst verschiebt, wenn der Blick auf der Richtlinie hingleitet. Ist also die letztere unbegrenzt, so ändert dabei das Netzhautbild im Ganzen seinen Ort auf der Netzhaut nicht, sondern nur die Einzelpunkte desselben verschieben sich in der Bahn des Bildes. In dieser Beziehung verhält sich das Bild einer Richtlinie ebenso, wie das Bild einer Geraden, welche durch den primären Blickpunkt geht. Denn das Bild einer solchen verschiebt sich ebenfalls nur in sich selbst, wenn der Blick an ihr hinläuft. Hieraus folgert Helmholtz, dass die Richtlinien ebenfalls gradlinig, oder als grösste Kreise des kugeligen Sehfeldes erscheinen müssen. Er erklärt ferner hieraus, dass ihm, wie S. 371 erörtert wurde, die Richtlinien auch bei ruhendem Blicke geradlinig erscheinen, wenn er nicht sie selbst, sondern den zugehörigen primären Punkt des Blickfeldes fixirt.

Da die Erörterung der Theorien, welche über die Entwicklung des Raumsinnes, sei es in ontogenetischer oder phylogenetischer Beziehung aufgestellt worden sind, nicht im Plane dieser Abhandlung liegt, so möge zum Verständniss der obigen Ansicht von Helmholtz hier nur erwähnt werden, dass derselbe die Raumwerthe der Netzhaut als etwas lediglich im Laufe des individuellen Lebens Erworbenes ansieht. Hat der Anfänger im Sehen eine Richtlinie des Gesichtsfeldes mit dem Blicke durchlaufen und sie trotz ihrer Krümmung geradlinig gesehen, weil ihr Bild sich bei der Bewegung in sich selbst verschob, und sein Blick kehrt nun zum primären Punkte zurück, so nimmt er nach Helmholtz die jetzt indirect gesehene Linie nach wie vor für eine Gerade und gewöhnt sich so, die Bilder derjenigen Netzhautlinien, welche den indirect gesehenen Richtlinien entsprechen, auf gerade Linien des Aussenraumes zu beziehen.

Wir haben gesehen, dass diejenigen Augenbewegungen, welche mit gleichzeitiger Rollung um die Gesichtslinie erfolgen, zu Gesichtstäuschungen führen, und könnten es daher wünschenswerth finden, dass solche Rollungen gar nicht vorkämen. Indessen ist dies schon theoretisch genommen unmöglich, weil das Auge keine frei bewegliche Kugel ist, und wäre es auch eine solche, so würde damit der andre und gewiss viel grössere Uebelstand verbunden sein, dass bei einer und derselben Stellung der Gesichtslinie, insbesondere auch bei Primärstellung, die Netzhaut und ihre Mittelschnitte in die verschiedensten Lagen kommen müssten,

so dass selbst in der Primärstellung von einem bestimmten Lageverhältniss zwischen den Mittelschnitten der Netzhaut und den Verticalen und Horizontalen des Aussenraumes nicht mehr die Rede sein könnte. Soll aber jeder bestimmten Stellung der Gesichtslinie relativ zum Kopfe eine ganz bestimmte Lage der Netzhaut unabänderlich zugehören, so werden, wie Helmholtz [1] hervorgehoben hat, die dann überhaupt unvermeidlichen Rollungen durch die Bewegung nach dem Listing'schen Gesetz auf die Weise vertheilt, dass sie um so kleiner sind, je näher die Bewegungsbahnen der Mittellage der Gesichtslinie sind. Dies ist, wenn die Mittellage der Primärstellung entspricht, offenbar die zweckmässigste Vertheilung der unvermeidlichen Rollungen, insoweit man annehmen darf, dass die Häufigkeit, mit welcher die Gesichtslinie eine Secundärstellung einnimmt, um so grösser ist, je näher diese der Mittelstellung liegt. Eine wichtige Folge des Listing'schen Gesetzes ist also die, dass durch dasselbe die unvermeidlichen Rollungen und die dadurch bedingten Scheinverschiebungen der Aussendinge möglichst vermieden sind, und die Localisirung bei bewegtem Blicke mit der bei ruhendem Blicke in den grösstmöglichen Einklang gebracht ist. Nehmen wir dazu die Thatsache, dass nach Listing's Gesetz die Bewegungen des Doppelauges beim Fernsehen zugleich derart sind, dass immer eine möglichst vollkommene Correspondenz der Netzhautbilder erhalten bleibt, so ist die Bedeutung dieses Gesetzes für das Sehen mit bewegtem Blicke im Wesentlichen gekennzeichnet.[2]

II. Die Localisirung bei den Blickbewegungen nach der Dimension der Tiefe.

Ausser den Breiten- und Höhenbewegungen des Blickpunktes und den aus gleichzeitiger Breiten- und Höhenbewegung resultirenden schrägen Bewegungen sind noch die Bewegungen des Blickpunktes nach der Dimension der Tiefe zu erörtern. Auch bei diesen geht der Aenderung der Convergenz die entsprechende Ortsveränderung der Aufmerksamkeit voraus und giebt erst zu jener den Anstoss. Die Aussenpunkte, welche bei Beginn der Blickbewegung soeben noch correspondirende Bilder auf der Doppelnetzhaut gaben, erzeugen im nächsten Augenblicke wegen der veränderten Convergenz der Gesichtslinien querdisparate Bilder, welche bis zu einer gewissen Grösse der Disparation und beim gewöhnlichen Sehen fast immer einfach gesehen werden. Eine Scheinbewegung der Aussendinge nach der Dimension der Tiefe tritt aber auch hier nicht ein, weil die durch die Verschiebung der Netzhautbilder bedingte Aende-

1 Helmholtz, Physiol. Optik S. 484.

2 Ueber die Versuche einer theoretischen Ableitung, beziehungsweise genetischen Erklärung des Listing'schen Gesetzes vergl. Helmholtz, Physiol. Optik § 27; Hering, Beitr. z. Physiol. V. § 114 und Die Lehre vom binocul. Sehen § 19; Donders, Arch. f. d. ges. Physiol. XIII. S. 373.

rung des relativen Tiefenwerthes der Sehdinge compensirt wird durch die mit der Translocation der Aufmerksamkeit gesetzte Aenderung der absoluten Tiefenwerthe, oder anders gesagt, durch die veränderte Lage des Kernpunktes.

Wird bei der Convergenzänderung die Disparation der Netzhautbilder zu gross, und achten wir besonders auf die Doppelbilder, so zeigen diese während der Näherung oder Fernerung des Blickpunktes eine seitliche Bewegung, indem das eine sich nach rechts, das andre nach links verschiebt, womit sich zugleich eine Drehung der Bilder verbinden kann, falls die Augen während der Bewegung eine Rollung erfahren. Da bei vielen Menschen der Gebrauch beider Augen kein ganz gleichmässiger ist, sondern dieselben öfters nur ein Auge und dann fast immer dasselbe benutzen, so ist meistens die Bewegung beider Doppelbilder nicht gleich gross, vielmehr scheint sich das Trugbild des für gewöhnlich einseitig benutzten Auges langsamer seitwärts zu bewegen, als das andre, oder es steht unter Umständen ganz still, und das andre bewegt sich allein. Es ist diese Erscheinung im Einklang mit dem in Cap. V erörterten Verhalten der Sehrichtungen bei Personen, welche oft unocular sehen.

Eine sehr auffällige Scheinbewegung, auf welche Hering[1] hingewiesen hat, tritt ein, wenn bei einäugigem Sehen der Fixationspunkt aus der Ferne in die Nähe verlegt wird oder umgekehrt. Dieselbe erläutert zugleich das Gesetz der Sehrichtungen und das der associirten Innervation.

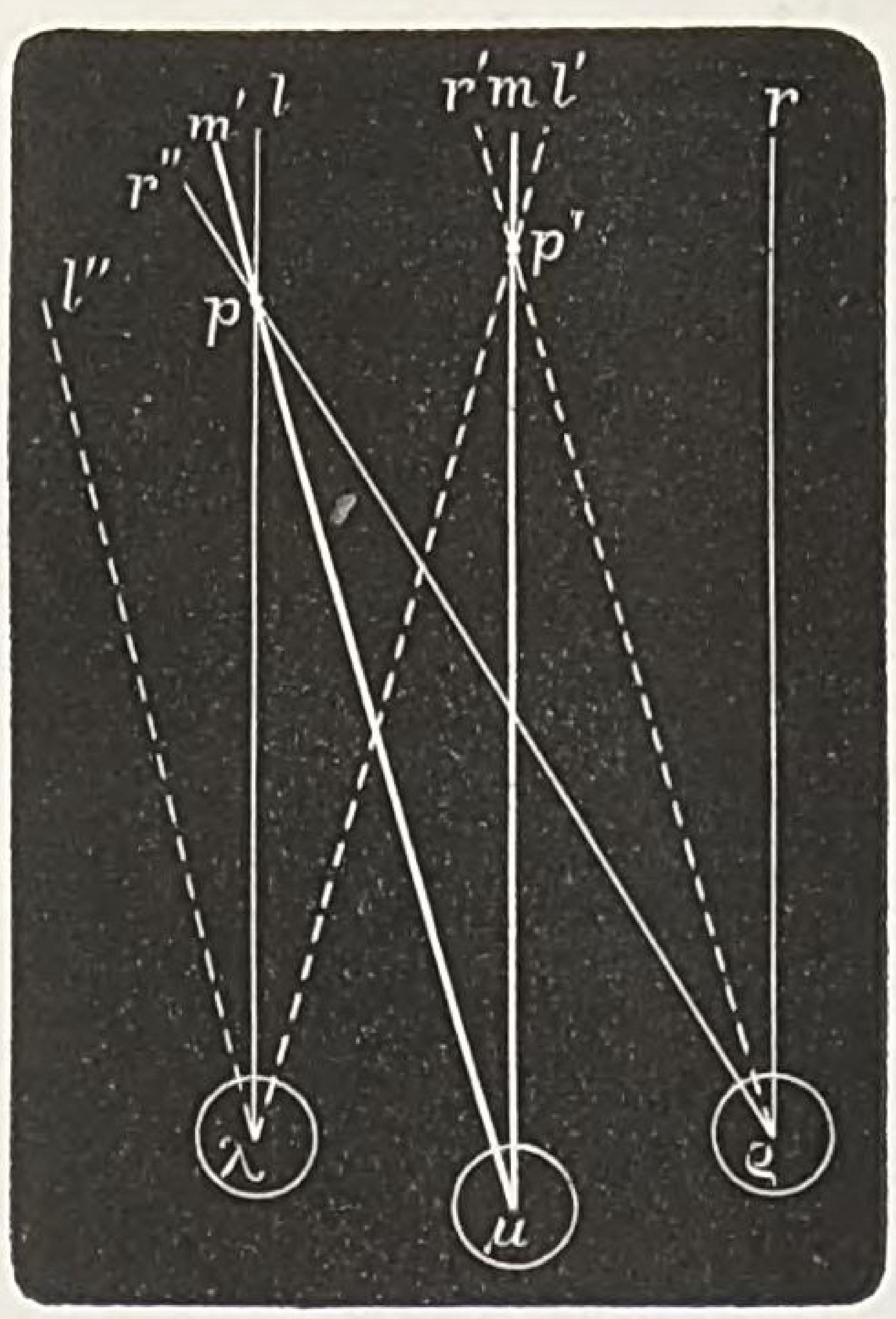


Fig. 56.

Fixirt man nämlich zunächst einen fernen Punkt, so dass die Gesichtslinien (λl und ϱr Fig. 56) parallel liegen, und bringt in die eine, z. B. linke Gesichtslinie ein kleines nahes Object (p), so scheint sich dieses, wenn man das rechte Auge schliesst und dann für das nahe Object accommodirt, nach links zu bewegen. Das Object erscheint nämlich, ehe es noch fixirt wird, nicht nur näher, als der anfangs betrachtete ferne Punkt, sondern auch nach links von der Medianebene, und der Aufmerksamkeitsort wird also von dem fernen medianen nach einem nahen seitlichen Punkte des Raumes verlegt. Dies bedingt nicht nur

1 Hering, Die Lehre vom binocularen Sehen § 1.

eine Aenderung des absoluten Tiefenwerthes des Kernpunktes, sondern auch eine Aenderung der absoluten Breitenwerthe. Der Aenderung des ersteren entspricht die Verlegung des Kernpunktes aus der Ferne in die Nähe, der Aenderung der Breitenwerthe eine Verschiebung desselben aus der Medianebene nach links. Da sich aber bei dieser Aenderung der absoluten Breitenwerthe der relative Breitenwerth des Netzhautbildes vom fixirten Objecte (p) nicht ändert, vielmehr das linke Auge seine Stellung zum Objecte beibehält, so ergiebt sich eine Scheinbewegung.

Der Aenderung des absoluten Tiefenwerthes entspricht eine Convergenzinnervation, welche für sich den Blickpunkt ungefähr nach p' verlegen würde, der Aenderung der Breitenwerthe eine Innervation zur Linkswendung beider Gesichtslinien, welche dieselben in die Lagen $\varrho r'$ und $\lambda l''$ bringen würde, und welche zugleich die Linkswendung der binocularen Blicklinie aus μm nach $\mu m'$ bedingt. Beide Innervationen finden aber gleichzeitig statt und heben sich in der oben beschriebenen Weise für das linke Auge in ihrer Wirkung auf, während sich ihre Wirkungen für das rechte summiren. So bleibt die linke Gesichtslinie in ihrer Lage, die des geschlossenen Auges kommt ungefähr nach $\varrho r''$ zu liegen und das Object p erscheint annähernd da, wo es wirklich liegt.

Da infolge der Aenderung der Convergenz und Accommodation das linke Auge eine kleine negative Rollung um die festliegende Gesichtslinie erfährt (vergl. S. 497), so verdreht sich das Netzhautbild und man sieht, wenn man als ferneres oder näheres Fixationsobject eine gerade Linie benützt, eine schwache Scheindrehung derselben im entgegengesetzten, positiven Sinne. Endlich zeigt sich auch eine sehr schwache Scheinverschiebung des fixirten Punktes nach unten, was auf einer entsprechend kleinen Abweichung des Auges nach oben beruht.

Man darf bei dem beschriebenen Versuche nicht ein Auge benutzen, welches man sehr viel zu einäugigem Sehen zu gebrauchen pflegt, weil diesenfalls die binoculare Hauptsehrichtung mehr oder weniger genau mit der Gesichtslinie dieses Auges zusammenfällt. Macht man dann aber den Versuch mit dem andern Auge, so ist die Scheinbewegung um so auffallender. Wer stets beide Augen zugleich zu benutzen pflegt, wird mit jedem Auge denselben Erfolg haben. Die ausführliche Beschreibung des Versuches mit allen Cautelen siehe bei Hering (l. c.).

Einfluss der Blickbewegung auf die Sehgrösse. Wenn man die Sehrichtungen in der Weise divergirend annimmt, wie es im Cap. V geschehen ist, so scheint damit zugleich gesagt, dass das einem bestimmten Netzhautbilde entsprechende Sehding um so grösser ist, je entfernter es im Sehraume liegt, wonach die Grösse eines Sehdinges einerseits der Grösse des Netzhautbildes, anderseits der Entfernung, in welcher es erscheint, proportional sein müsste. Bei ruhendem Blicke aber ist es schwer, sich mit Bestimmtheit darüber auszusprechen, in wie weit dem so ist. Der Theil des Sehraumes,

dessen Inhalt wir genauer auffassen, ist auch nach der Dimension der Tiefe nur klein, so dass die Entfernungsdifferenzen der deutlichen Sehdinge nur gering sind. Je grössere Uebung man aber im festen Fixiren und indirecten Sehen hat, desto leichter zerfällt Alles in Doppelbilder. Dazu kommt, dass es schwer ist, bei Vergleichung der Grösse verschieden entfernt liegender Sehdinge streng auseinander zu halten die Grösse, in der man die Dinge sieht und diejenige, in der man sich dieselbe denkt. Erstere ist die eigentliche Sehgrösse, letztere die geschätzte Grösse.

Unter scheinbarer Grösse hat man bald die geschätzte Grösse, bald auch die Grösse des Netzhautbildes oder den Gesichtswinkel (die Kleifung) verstanden. Die Sehgrösse ist von beiden verschieden. Hält man z. B. ein quadratisches Papier horizontal vor sich hin, so dass seine Ränder parallel der Medianebene, beziehungsweise der Frontalebene liegen, und fixirt ungefähr seine Mitte unocular, so sieht man dasselbe nicht genau quadratisch und horizontal. Vielmehr zeigen der rechte und linke Rand des Sehdinges eine schwache Convergenz und der fernere Rand ist etwas kürzer, als der nähere; zweitens liegt der fernere Rand etwas höher als der nähere. Im Netzhautbilde des Quadrates convergiren die seitlichen Ränder unvergleichlich stärker und der fernere Rand ist viel kürzer als der nähere. Das Verhältniss der Grössen des fernen und nahen Randes ist also am Sehdinge ein andres als am Netzhautbilde, und wieder ein anderes am wirklichen Dinge. Die unrichtige Form des Sehdinges hindert aber nicht, zu urtheilen, dass das entsprechende Aussending ein quadratisches ist, und demnach den fernen Rand ebenso gross zu schätzen, als den näheren. Dieses Beispiel zeigt uns also den Unterschied zwischen sogenannter scheinbarer Grösse, Sehgrösse und geschätzter oder gedachter Grösse.

Fixirt man die Mitte des Quadrates flüchtig binocular und ohne auf die Doppelbilder der seitlichen Ränder zu achten, so sieht man es fast genau quadratisch, weil die binoculare Tiefenlocalisirung genauer ist, als die unoculare; doch bleibt ein kleiner Fehler im Sinne des bei einäugiger Fixation begangenen bestehen. Dieser ist viel bedeutender, wenn es sich um grössere Entfernungsdifferenzen der bei ruhendem Blicke gleichzeitig sichtbaren Dinge handelt. Es sind bei ruhendem Blicke überhaupt alle Sehdinge im Vergleich zu den wirklichen in der Richtung nach der Tiefe auffallend zusammengeschoben, und je fester und länger man fixirt und je grössere Uebung man im Doppelsehen hat, desto mehr rückt Alles in eine durch den Kernpunkt gehende Fläche, die Kernfläche, zusammen, so dass, wenn

nicht Erfahrungsmotive zu Hülfe kommen, schliesslich nur noch die mit sehr geringer Querdisparation abgebildeten Dinge vor und hinter jener Fläche erschienen. Den geringen Entfernungsdifferenzen der Sehdinge entspricht dann auch eine geringe Verschiedenheit ihrer Sehgrösse, eine Verschiedenheit, die in auffallendem Missverhältniss zu der Grössenverschiedenheit der wirklichen Dinge steht.

Anders verhält es sich, wenn man den Gesichtsraum mit dem Blicke nach der Dimension der Tiefe durchmisst. Hierbei rückt Alles nicht allzufern Liegende deutlich und der Wirklichkeit viel entsprechender nach der Tiefe auseinander. Wir sind also betreffs der richtigen Tiefenlocalisirung fast noch mehr als bei der Durchmusterung des Sehraumes nach der Dimension der Höhe und Breite darauf angewiesen, durch successives Deutlichsehn der Einzelheiten den Mangel einer simultanen deutlichen Wahrnehmung eines grösseren Sehraumbezirkes zu ersetzen. So wenig zugegeben werden kann, dass die Localisirung der Netzhautbilder in verschiedene Entfernung lediglich durch Convergenzänderungen bedingt sei, so sehr muss im Sinne Brücke's betont werden, dass uns erst durch die Convergenzänderungen die volle Ausnützung und Verwerthung unseres auf der Disparation der Netzhautbilder beruhenden Vermögens der Tiefenwahrnehmung möglich wird.

Mit der Näherung und Fernerung des Blickpunktes geht nun einher das Grösser- oder Kleinersehen des jeweiligen fixirten Dinges. Hält man von zwei gleichlangen und gleichbreiten Streifen Papier den einen 15 dm. entfernt und nach links, den anderen 30 dm. entfernt und nach rechts von der Medianebene und fixirt sie abwechselnd, so sieht man den entfernten nicht ungefähr halb so gross, als den nähern, obwohl sein Netzhautbild nur etwa halb so gross ist, sondern man sieht ihn nahebei, nicht ganz gleich gross wie den näheren. Achtet man aber, während man den einen dauernd fixirt, zugleich auf den andern, so erscheint derselbe in Doppelbildern, die sich meistens theilweise decken, wodurch die Vergleichung der Breite des näheren mit der des ferneren gestört wird. Dagegen kann man die Länge des einfach gesehenen näheren Streifen mit der Länge der Trugbilder des ferneren vergleichen. Man sieht dann die Trugbilder wesentlich kürzer als den nahen einfach erscheinenden Streifen, übrigens aber keineswegs nur halb so lang als diesen. Es entspricht dies der im Cap. VIII. erörterten Thatsache, dass die Localisirung der Trugbilder nach der Tiefe eine unsichere und der wirklichen Entfernung des Objects nicht entsprechende ist. Nur wenn die Trugbilder des einen Streifens dem Bilde des anderen

sehr nahe liegen, kann man eine genauere Vergleichung ihrer beiderseitigen scheinbaren Grössen oder der Gesichtswinkel anstellen.

Achtet man, während man den Blick von dem näheren Papierstreifen auf den ferneren übergehen lässt, zugleich auf den ersteren, so sieht man denselben etwas grösser werden; umgekehrt nimmt die Sehgrösse des ferneren etwas ab, wenn man den Blick von ihm auf den näheren Streifen zurückführt.

Träufelt man eine Atropinlösung in ein Auge, so sieht man nach einiger Zeit mit diesem Auge alle nicht zu nahen Aussendinge kleiner, es tritt sogenannte Mikropsie ein, welche zuerst von Förster[1] näher erörtert wurde. Aubert[2] sah infolge des Einträufelns von etwa $^1/_{500}$ Gran Atropin nach 30 Minuten Buchstaben in 65 dm. Entfernung mit dem atropinisirten Auge nur halb so gross, als mit dem andern. Dabei erschienen die Buchstaben vollkommen scharf und war also das Auge genau accommodirt. Ursache des Kleinersehens ist nach Förster die grössere Accommodationsanstrengung, wie sie ein gesundes Auge nur bei entsprechend grösserer Nähe des Objectes nöthig hat. Trotzdem erscheinen aber merkwürdiger Weise die kleiner gesehenen Dinge nicht näher, sondern, wie Förster und Aubert angeben, vielmehr ferner als bei Betrachtung mit dem gesunden Auge. Ueber eine psychologische Erklärung dieser auffallenden Erscheinung vgl. Förster und Aubert (ll. cc.).

Die Aenderung der Sehgrösse bei Aenderungen der Accommodation zeigt sich auch unter gewöhnlichen Umständen. Wenn man von der einäugigen Fixirung eines fernen Objectes zur Betrachtung eines nahen übergeht, so scheint das ferne kleiner zu werden; umgekehrt wächst die Sehgrösse des näheren, wenn man wieder für das fernere accommodirt. Ueber weitere Beispiele vergl. insbesondere Panum.[3]

III. Die Localisirung bei secundären Lagen der binocularen Blicklinie.

Wir haben im Obigen die Localisirung während der Bewegung erörtert und gesehen, dass dieselbe einerseits vom Ortswechsel der Aufmerksamkeit und der dadurch gesetzten Aenderung der absoluten Raumwerthe, andererseits von der Art der ausgelösten Augenbewegungen und der dadurch bedingten Verschiebung der Netzhautbilder abhängt. Denken wir uns die Blickbewegung in einem beliebigen Momente sistirt, so wird jetzt die scheinbare Lage der Dinge ebenfalls einerseits von der Art abhängen, wie die absoluten Raumwerthe im Vergleich zur primären Lage des Blickpunktes verändert sind, anderseits von der Lage der Bilder auf die Doppelnetzhaut.

1 Förster, Ophthalmol. Beiträge S. 79. 1862.
2 Aubert, Physiologie der Netzhaut S. 329. 1865.
3 Panum, Arch. f. Ophthalmologie V. (1) S. 1. 1859.

Im ersten Abschnitte haben wir bereits die Richtigkeit der Localisirung bei festgehaltenem Blickpunkte für gewisse Lagen desselben untersucht und zwar insbesondere für den Fall, wo die binoculare Blicklinie horizontal und median liegt, und also die Gesichtslinien parallel sind oder symmetrisch convergiren. Betreffs der sonstigen Lagen der binocularen Blicklinie und des Blickpunktes haben wir auf den Mangel eingehender Untersuchungen und im Uebrigen auf diesen Abschnitt verwiesen.

Die Localisirung des Kernpunktes. Jeder bestimmten Lage des (binocularen) Blickpunktes entspricht bei unveränderter primärer Kopfstellung eine ganz bestimmte Stellung des Doppelauges. Anderseits entsprechen den verschiedenen Lagen des Aufmerksamkeitsorts im Raume [1] die verschiedenen Stellungen des Doppelauges, allerdings nicht genau, aber doch mit einer, je nach der Lage jenes Ortes verschiedenen Annäherung. Wir können auch im absolut dunklen Raume unsre Aufmerksamkeit dem oder jenem Orte zuwenden, als ob wir dort etwas suchten oder erwarteten. Dann stellen sich unsre Augen ungefähr auf diesen Ort ein. Taucht dann wirklich an diesem Orte etwas Sichtbares auf, so ist sein scheinbarer Ort schon von vornherein bestimmt.

Am sichersten passt sich die Augenstellung der Richtung der Aufmerksamkeit an, wenn der Ort der letzteren horizontal vor uns in der Medianebene und also geradeaus liegt. Gesetzt nun, wir hätten im dunklen Raume unsere Aufmerksamkeit absichtlich in dieser Weise und zwar in die Ferne gerichtet, so wird auch die binoculare Blicklinie nahezu horizontal und median liegen; mit welcher Genauigkeit es der Fall ist, wurde nicht untersucht.

Wird nun plötzlich ein seitlich, höher oder tiefer gelegenes fernes Object sichtbar, so gibt dasselbe peripher liegende Netzhautbilder von bestimmtem Höhen- und Breitenwerthe, wodurch zugleich seine scheinbare Lage mehr oder minder genau bestimmt ist. Dadurch, dass sich nun sofort die Aufmerksamkeit, und in Folge dessen wieder die binoculare Blicklinie auf diesen Ort richtet, ändert sich an der bereits erfolgten Localisirung nichts wesentliches.

Analog verhält es sich, wenn das plötzlich erscheinende Object relativ nahe liegt. Da die Gesichtslinien, wie wir annehmen durften, beim Hinausblicken in die Ferne des Dunkelraumes nahezu parallel liegen oder wenigstens nur schwach convergiren, so wird das auftauchende Object Bilder von ungleichseitiger Disparation geben und

1 Genauer gesagt im Fühlraume (vergl. S. 523 Anm.).

dementsprechend mehr oder weniger nahe erscheinen. Die auf diesen nähern Ort translocirte Aufmerksamkeit löst nun die Convergenzbewegung aus, und so wird der Blickpunkt unter fortwährender Leitung des Doppelnetzhautbildes an den Ort des wirklichen Objects gebracht.

Im Wesentlichen ist also unter den angeführten Bedingungen die Localisirung des Objects schon auf Grund der Raumwerthe der Netzhautbilder erfolgt, ehe die entsprechende Augenstellung eingetreten ist, und wir können daher nicht die Art der Augenstellung als das Bedingende der annähernd richtigen Localisirung betrachten. Eine andere Frage ist, inwieweit durch die Richtung und Dauer der Verschiebung des Netzhautbildes während der Blickbewegung die Localisirung eine Correctur erfährt und an Richtigkeit gewinnt. Hierüber liessen sich nur Vermuthungen aufstellen, da die Frage noch nicht experimentell untersucht ist.

Das erörterte Beispiel lehrt, dass die Localisirung des fixirten Objects bei secundärer Lage der binocularen Blicklinie und des Blickpunkts im Wesentlichen davon abhängt, dass die Aufmerksamkeit an den ungefähr entsprechenden Ort verlegt werden muss, wenn anders die Augen sich passend einstellen sollen, und das Object einfach und deutlich gesehen werden soll. Jede Lage des Aufmerksamkeitsorts bedingt eine, innerhalb gewisser Grenzen bestimmte Augenstellung, und wo die Aufmerksamkeit ist, da ist auch die Kernstelle des Sehraums und ebenda erscheint also auch das fixirte Object.

Bei einäugigem Sehen ist die Localisirung nach der Dimension der Tiefe eine sehr unbestimmte, falls anderweite Erfahrungsmotive ausgeschlossen sind. Wir sind dann einzig und allein auf das Hülfsmittel der Accommodation angewiesen. Je näher der fixirte Punkt liegt, desto stärker müssen wir accommodiren, um ihn möglichst scharf zu sehen. Während wir dies thun, tritt zwar auch eine ungefähr entsprechende Zunahme der Convergenz der Gesichtslinien ein, aber es fehlt die Möglichkeit, das Sehding gleich von vornherein auf Grund der Disparation der Netzhautbilder zu localisiren, beziehungsweise die Nothwendigkeit, eine ganz bestimmte Convergenz festzuhalten, um das Object einfach zu sehen. Wundt liess durch eine kurze Röhre einen, vor einer einfarbigen fernen Wand aufgehängten Faden von unbekannter Dicke fixiren und seine Entfernung schätzen; auch entfernte oder näherte er den Faden und bestimmte die Grösse der Verschiebung, welche nöthig war, damit der Beobachter die Art der Ortsänderung des Fadens erkenne. Das Ergebniss seiner Versuche fasste er in Folgendem zusammen: die Accom-

modation sagt niemals etwas aus über die absolute Entfernung der Gegenstände, sondern sie giebt nur eine äusserst oberflächliche Kenntniss ihrer relativen Lage, indem sie es möglich macht, das Nähere vom Ferneren zu unterscheiden. Wenn ein und dasselbe Object seine Lage im Raume ändert, so giebt uns die Accommodation für sich nur Aufschluss über eine Art dieser Lageänderung, nämlich über die Annäherung ans Auge; damit aber diese Annäherung wahrnehmbar werde, muss sie eine bestimmte Grösse erreichen, die mit der Entfernung vom Nahpunkte zunimmt; d. h. in jeder Distanz vom Auge existirt eine bestimmte Unterscheidungsgrenze der Annäherung. Diese Unterscheidungsgrenze ist nicht von constanter Grösse, sondern namentlich in hohem Grade dem in längerer Zeit wirksam werdenden Einflusse der Uebung und dem in kürzerer Zeit sich geltend machenden Einflusse der Ermüdung unterworfen.

Wir haben uns im Obigen bemüht, die bis hierher in diesem Capitel besprochenen Thatsachen ohne die Mithülfe irgend welcher Hypothese darzustellen. Aus denselben ergiebt sich unmittelbar, dass die Augenstellung von der Localisirung der Aufmerksamkeit abhängig ist, welche letztere zugleich auch die Localisirung des Kernpunktes und damit den scheinbaren Ort des fixirten Objectes bestimmt. Wir dürfen aber nicht verschweigen, dass diese Auffassung von der Mehrzahl der Autoren nicht getheilt, sondern bis jetzt nur von HERING[1] vertreten wird. Derselbe ist zuerst der früher sehr verbreiteten Ansicht entgegengetreten, nach welcher sich Alles umgekehrt verhalten und die Localisirung des Kernpunktes von der Augenstellung abhängen soll. Man nahm und nimmt zum Theil auch noch einen sogenannten Muskelsinn des Gesichtsorganes an. Der jeweilige Verkürzungsgrad der Augenmuskeln soll hiernach Gefühle oder Empfindungen erzeugen, auf Grund deren die Localisirung des fixirten Punktes erfolgen soll. „Die Feinheit der Muskelempfindungen“, sagte WUNDT[2], „geht so weit, dass die Muskeln in dieser Hinsicht unsern schärfsten objectiven Sinnesorganen, dem Gesicht und Gehör, an die Seite gestellt werden können.“

Die oben angeführten, zum grossen Theil längst bekannten Thatsachen lehren aber, dass die Augenstellungen an sich, und also auch die etwaigen Empfindungen derselben ohne merklichen Einfluss auf die Localisirung sind. Man hat daher den Ausweg ergriffen, an die Stelle der Muskelempfindungen sogenannte Innervationsgefühle zu setzen, welche durch die motorische Innervation schon im Centralorgane und nicht erst in der Peripherie erzeugt werden oder die erstere begleiten sollen. Die Thatsachen aber nöthigen nicht zu dieser Annahme, sondern lediglich gewisse theoretische Voraussetzungen, die hier übergangen werden dürfen. Denkt man sich, dass der jeweilige Ort der Aufmerksamkeit

1 HERING, Beiträge zur Physiologie I. § 11. 1861.
2 WUNDT, Ztschr. f. rat. Med. (3) XV. S. 143. 1862.

bedingt ist durch einen bestimmten psychophysischen Process, so kann man diesen Process auch zugleich als das physische Moment gelten lassen, welches die entsprechende Innervation der Augenmuskeln auslöst. Es ist von vornherein nicht einzusehen, was durch die hypothetische Einschiebung eines weiteren physischen oder psychischen Vorganges, welcher den Innervationsgefühlen zu entsprechen hätte, irgend gewonnen werden kann. Wir haben deshalb die Darstellung der Thatsachen nicht durch Einführung der hypothetischen Innervationsgefühle compliciren wollen, obwohl dieselben von hervorragenden Forschern angenommen werden.

Dass die Augen bei ihren Bewegungen gewisse Empfindungen erzeugen, welche wir in die Gegend der Orbita localisiren, ist sicher. Macht man eine starke Convergenzbewegung, so hat man eine deutliche Empfindung in der Augenhöhle, schwächere Empfindungen bemerkt man bei jeder nicht allzu kleinen Wendung des Blickes. Die Nerven der Lider, der Conjunctiva und auch der tieferen Theile vermitteln diese Binnenempfindungen des Auges, wie wir sie nennen könnten. Für andere Glieder, insbesondere die Extremitäten ist festgestellt, dass ihre Binnenempfindungen uns die Wahrnehmung ihrer Lage und mittelbar die richtige Localisirung von Tastempfindungen mit ermöglichen helfen, daher man für die Augen das Analoge annehmen zu dürfen glaubte. Hier aber liefert die Art, wie wir bei passiver oder durch unwillkürliche Muskelcontraction erzeugter Verschiebung der Augen localisiren, sofort den Beweis, dass die etwaigen Binnenempfindungen für die Localisirung nicht das Entscheidende sind.

Wenn oben die Translocation der Aufmerksamkeit als das Motiv der Augenbewegung hingestellt wurde, so soll damit nicht gesagt sein, dass wir überhaupt nicht im Stande seien, unsre Aufmerksamkeit wandern zu lassen, ohne dass sofort auch die entsprechenden Augenbewegungen ausgelöst werden. Letzteres gilt zwar für die meisten Menschen, aber durch Uebung kann man es sehr wohl dahin bringen, auch bei festgehaltenem Blick die Aufmerksamkeit wandern zu lassen, und indirect Gesehenes besonders zu beachten. Doch muss man hierbei immer zugleich auf das direct Gesehene merken. Lässt man dieses nur einen Augenblick ausser Acht, so erfolgt sofort eine Augenbewegung, wie man mittels der Nachbilder oder durch Auscultation der Muskelgeräusche des Auges leicht erkennen kann. Es handelt sich also hierbei weniger um eine eigentliche Translocation, als vielmehr um eine grössere, über das gewohnte Maass hinausgehende Ausbreitung der Aufmerksamkeit, wobei immer der Haupttheil derselben dem direct Gesehenen zugewandt bleiben muss. Jedenfalls ist ein längeres indirectes Sehen bei ruhendem Blicke ein erzwungener Zustand. Will man annehmen, dass diejenigen Ortsänderungen der Aufmerksamkeit, welche motorische Folgen haben, sich specifisch von denen unterscheiden, welche bei ruhendem Blicke stattfinden können, so wird dadurch an der Giltigkeit der oben gemachten Erörterungen nichts geändert.

Die Localisirung des übrigen Sehraumes. Ausser der Localisirung des Kernpunktes und der dadurch gegebenen Lage der Hauptsehrichtung kommt die Frage in Betracht, in wieweit wir bei

secundären Lagen der binocularen Blicklinie und des Blickpunktes die übrigen Theile des jeweiligen Sehraums richtig localisiren.

Zunächst hat man hierbei an die verticalen und horizontalen Linien zu denken. Zwischen beiden besteht ein sehr wesentlicher Unterschied insofern, als es nur eine verticale Richtung, dagegen unendlich viele horizontale gibt. Die richtige Localisirung verticaler Linien ist dadurch unvergleichlich begünstigt. Auch scheint es in der That, dass wir bei ungezwungener Haltung des frei beweglichen Kopfes seitlich gelegene verticale Linien ziemlich richtig sehen, wenn wir sie bei horizontaler oder nicht allzustark gehobener oder gesenkter Blickebene betrachten. Es steht dies in Einklang damit, dass, wie oben (S. 495) bemerkt wurde, verticale Linien sich unter solchen Umständen immer ziemlich genau auf dem mittlen Längsschnitte oder wenigstens auf demselben Meridiane abbilden, welcher auch das Bild einer bei Primärstellung fixirten Verticalen empfängt. Dies gilt selbstverständlich dann nicht mehr, wenn der Kopf bei Betrachtung der seitlichen Verticalen fixirt ist. Ausser den verticalen bilden auch die querhorizontalen, also der primären Frontalebene parallelen Linien einen besonderen Fall, weil sie uns häufiger vorkommen als anders gelegene Horizontallinien. Besondere Untersuchungen über die Localisirung fixirter gerader Linien bei zwangloser oder bei fester primärer Kopfhaltung sind nicht angestellt worden. Einige Specialfälle sind in Cap. VII., andere im Folgenden erwähnt.

Die Localisirung verticaler, beziehungsweise horizontaler Linien bei vor- oder zurückgeneigtem Kopfe und seitlichen Blickrichtungen hat Helmholtz untersucht. Es ist aber zu bemerken, dass solche Kopfhaltungen beim gewöhnlichen Sehen nicht benutzt werden.

Zur Untersuchung bei Parallelstellungen spannte Helmholtz[1] über das eine Ende einer cylindrischen Röhre von etwa einem Fuss Länge einen schwarzen Faden als Durchmesser aus, nahm das andre Ende der Röhre vor ein Auge, während das zweite Auge geschlossen war, hielt vor das entferntere Ende der Röhre ein weisses Blatt Papier, so dass er nichts von den Gegenständen des Zimmers sah, und suchte nun den schwarzen Faden durch Drehung der Röhre um ihre Längsaxe möglichst genau horizontal oder vertical zu stellen, und zwar mit parallel gerichteten Gesichtslinien, eine Bedingung, die er auch bei verschlossenem zweiten Auge zu erfüllen gelernt hat. Wenn er dann das weisse Papier von dem anderen Ende der Röhre wegzog, konnte er die Richtung, welche er dem Faden gegeben hatte, mit der Richtung verschiedener objectiver horizontaler und verticaler Linien vergleichen, die sich im Zimmer vorfanden. Er setzte sich bei diesen Versuchen fest auf einen Lehnstuhl und bog den Kopf bald vornüber, bald hintenüber, oder hielt

1 Helmholtz, Physiol. Optik S. 608.

ihn vertical, während die Röhre immer horizontal gehalten, dabei aber bald gerade aus, bald nach rechts, bald nach links gerichtet wurde, so dass sich dabei die Gesichtslinie nach einander in alle möglichen Lagen gegen den Kopf einstellte.

Es zeigte sich, dass in allen diesen Stellungen, soweit das Auge sich ohne fühlbaren Zwang bewegen konnte, die horizontal erscheinende Linie wirklich horizontal war und die vertical scheinende nur um einen solchen Winkel von der wirklich verticalen Richtung abwich, wie der mittle Längsschnitt des betreffenden Auges vom wirklich verticalen Meridian abweicht.

Zu analogen Ergebnissen kam Dastich unter Leitung von Helmholtz.[1] Er betrachtete durch eine Röhre einen entfernten, vor einer gleichfarbigen Wand hängenden Faden, dessen Lage geändert wurde, bis er vertical schien. Doch wurde auch hier die Stellung des geschlossenen Auges nicht besonders controlirt.

Hiernach würde also bei diesen secundären Parallelstellungen die jeweilige Lage der Netzhaut relativ zur Blickebene, insbesondere die Lage des mittlen Längs- und Querschnittes bei der Localisirung der Netzhautbilder sozusagen mit eingerechnet.

Ferner untersuchte Helmholtz[2] auch bei Convergenz und binocularem Sehen. Bei aufrechtem Kopfe sah er einen wirklich verticalen Faden stets vertical, gleichviel ob er geradeaus oder seitwärts blickte.[3] Bei zurückgebeugtem Kopfe musste er das untere Ende des Fadens (innerhalb der durch die binoculare Blicklinie gelegten Verticalebene) etwas heranziehen, bei vorgebeugtem Kopfe aber etwas entfernen, um den Faden vertical zu sehen, und zwar war dies nicht nur bei symmetrischer Convergenz der Fall, sondern auch bei unsymmetrischer. Er kam zu dem Schlusse, dass bei nicht primärer Lage der Blickebene und Convergenz der Gesichtslinien „diejenigen Linien vertical zur Visirebene (Blickebene) erscheinen, welche sich abbilden auf solchen Meridianen des Auges, welche bei der Stellung des Auges parallel der mittleren Sehrichtung (Hauptsehrichtung) wirklich vertical sein würden zur Visirebene.“

Auf Grund aller dieser Ergebnisse möchte Helmholtz dem Gesetze der identischen Sehrichtungen eine etwas andre Fassung geben als Hering. „Man denke sich, sagt er, in der Mitte zwischen beiden Augen ein imaginäres mittleres Cyclopenauge, welches auf den gemeinsamen Fixationspunkt beider Augen gerichtet ist, und dessen Raddrehungen nach demselben Gesetze erfolgen, wie die der beiden wirklichen Augen. Man denke sich die Netzhautbilder aus einem der wirklichen Augen in dieses imaginäre Auge übertragen, so dass Blickpunkt auf Blickpunkt und Netzhauthorizont (mittler Querschnitt) auf Netzhauthorizont fällt. Dann werden die Punkte des Netzhautbildes nach aussen projicirt in den Richtungslinien des imaginären Cyclopenauges.“

Dieser Satz scheint im Widerspruch zu stehen mit den oben ange-

1 Helmholtz, Physiol. Optik S. 611.
2 Derselbe, Physiol. Optik. S. 662.
3 Dies stimmt betreffs der symmetrischen Convergenz nicht überein mit der S. 418 erwähnten Angabe Hering's, welche von Nagel bestätigt wurde. (Nagel, Jahresber. f. Ophthalm. II. Jahrg. f. d. Jahr 1871. S. 120 Anm.)

führten Sätzen über Localisirung bei Bewegung des Blickes. Denn wenn die jeweilige Lage der Netzhaut oder der sogenannte Raddrehungswinkel und also auch eine während der Bewegung des Blickes stattfindende Rollung bei der Localisirung mit eingerechnet würde, so sollte man meinen, dass eine gerade Linie, an welcher der Blick hingleitet, nie die von Helmholtz selbst beschriebene Scheinkrümmung oder Lagenänderung zeigen könne, sondern immer richtig localisirt werden müsse.

Genauigkeit der binocularen Tiefenwahrnehmung. Das Relief und kleine Entfernungsunterschiede werden um so sicherer gesehen, je näher die Objecte dem Längshoropter oder im besonderen Falle dem Punkthoropter liegen. Dass dies für den Punkthoropter gilt, hat zuerst Helmholtz[1] gezeigt. Er knickte einen geraden Draht in seiner Mitte so, dass seine beiden Hälften einen stumpfen Winkel bildeten, der äusserst wenig von einem doppelten rechten (gestreckten) Winkel abwich. Brachte er den Draht in ein solche Lage, dass er nahezu mit der Geraden des Punkthoropters zusammenfiel, so erkannte er die Knickung noch, während sie bei allen anderen Lagen des Drahtes nicht mehr wahrzunehmen war. Ferner ordnete er drei Stecknadelköpfe in einer horizontalen geraden Linie an. Tangirte diese Gerade den Müller'schen Horopterkreis, so konnten kleine Verschiebungen einer der beiden seitlichen Nadeln viel eher erkannt werden, als wenn die Reihe eine andere Lage in der Blickebene hatte. Lag die mittle Nadel median in einer Entfernung von etwa 50 cm., so bedurfte es nur einer Verschiebung der seitlichen Nadel von etwa ein Viertel Millimeter, um noch zu erkennen, dass die Nadelköpfe nicht mehr in einer Geraden lagen. Helmholtz[2] hat auf Grund solcher Versuche die Grösse der kleinsten Disparation der Netzhautbilder berechnet, bei welcher die Verschiebung der einen Nadel eben noch sicher erkannt wurde. Sie entsprach einem Gesichtswinkel von 60 1/2 Winkelsecunden oder 0,0044 mm. Lagenverschiedenheit der Netzhautbilder. Daraus folgt, um mit Helmholtz zu sprechen, „dass die Vergleichung der Netzhautbilder beider Augen zum Zwecke des stereoskopischen Sehens mit derselben Genauigkeit geschieht, mit welcher die kleinsten Abstände von einander von einem und demselben Auge gesehen werden.“

Nach Hering müssen die Nadelköpfe in der horizontalen Horopterlinie selbst liegen, wenn die grösste Unterschiedsempfindlichkeit für kleine Verschiebungen der einen Nadel erreicht werden soll. Bei obigem Versuche war dies jedenfalls sehr angenähert der Fall, weil Helmholtz selbst

1 Helmholtz, Arch. f. Ophthalmologie X. (1) S. 27. 1864. und Physiol. Optik S. 720.

2 Derselbe, Physiol. Optik S. 645.

bemerkt, dass die Nadeln keinen grossen Abstand von einander haben dürfen, wenn der Versuch das beschriebene Resultat haben soll.

Hering [1] hat sich zu zeigen bemüht, dass die Bedeutung, welche Helmholtz dem Punkthoropter zuschrieb, eigentlich der Längshoropterfläche zukommt, dem Punkthoropter aber nur insofern, als derselbe immer ein Theil des Längshoropters oder im besonderen Falle mit diesem identisch ist. Er erklärt diese Bedeutung des Längshoropters für die Tiefenwahrnehmung daraus, dass die Verschiedenheiten der queren Disparation um so genauer wahrgenommen werden, je kleiner die absolute Grösse der Disparation ist.

Für die meisten Menschen fällt beim Fixiren eines nicht zu nahen Punktes der Fussbodenfläche die letztere mit dem Längshoropter zwar nicht genau aber doch annähernd zusammen, woraus sich die ebenfalls zuerst von Helmholtz betonte Thatsache erklärt, dass wir das Relief des Fussbodens besonders genau wahrnehmen.

Helmholtz giebt an, dass für ihn bei Primärstellung der Augen die Fläche des Punkthoropters genau mit der horizontalen Fussbodenfläche zusammenfalle, was andre Beobachter für ihre Augen nicht bestätigen konnten. Uebrigens schreibt Helmholtz dem Horopter noch eine andere Bedeutung zu. Er meint, dass nicht nur das Relief, sondern auch die Lage der Dinge überhaupt dann am richtigsten wahrgenommen werde, wenn letztere im Punkthoropter liegen. Daraus erklärt er z. B., dass die Fussbodenfläche viel ausgedehnter und weiter hingestreckt erscheint, wenn man den Fussboden bei aufrechter Kopfhaltung betrachtet, als wenn man dabei den Kopf seitwärts neigt oder zwischen den gespreizten Beinen durchblickt; denn nur bei aufrechtem Kopfe kann der Fussboden mit dem Punkthoropter annähernd zusammenfallen. Nach Hering aber trägt zur richtigen Localisirung des Fussbodens gerade der Umstand mit bei, dass er nicht genau im Horopter liegt, vielmehr die jenseits des fixirten Punktes befindlichen Theile Bilder von ungekreuzter querer Disparation geben, während die näheren Theile sich mit gekreuzter Disparation abbilden. Der Hauptsache nach aber erklärt er die scheinbare Lage des Fussbodens aus einem Erfahrungsmotiv (vergl. Cap. XIII).

IV. Vergleichung von Grössen und Lagen.

(Augenmaass.)

E. H. Weber [2] hat zuerst den kleinsten Unterschied zu bestimmen versucht, welchen zwei nacheinander betrachtete Linien oder Strecken haben müssen, um eben noch mit Sicherheit als verschieden gross wahrgenommen zu werden. Er fand, dass es dabei

1 Hering, Beiträge zur Physiologie V. S. 354. 1864.
2 Weber, Handwörterb. d. Physiol. von Wagner III. 2. Abth. S. 559.

nicht auf die absolute, sondern auf die relative Längenverschiedenheit ankomme, und dass im günstigsten Falle Linien noch unterschieden wurden, deren Längen sich wie 100 : 101 verhielten. Zur Prüfung des WEBER'schen Satzes wurden nachher zahlreiche Versuchsreihen angestellt, aber meistens nicht nach WEBER's Methode des ebenmerklichen Unterschieds, sondern theils nach der Methode der richtigen und falschen Fälle, theils nach der Methode der mittlen Fehler.[1] Es ergab sich, besonders aus CHODIN's[1] Versuchen, dass der Satz durchaus keine strenge Gültigkeit hat. Dabei fand sich auch, dass die Vergleichung von verticalen Distanzen viel weniger genau ist, als die von horizontalen. Dem entspricht auch die Angabe von HELMHOLTZ[2], dass man bei Hälftung verticaler Strecken grössere Fehler macht, als bei Hälftung horizontaler.

Vergleicht man horizontale Distanzen mit gleich langen verticalen, so erscheinen letztere grösser als erstere. Sucht man eine verticale Strecke einer horizontalen gleich zu machen, so fällt die erstere zu kurz aus. Die hierbei begangenen Fehler sollen nach WUNDT[3] bis zu ein Fünftheil der horizontalen Strecke betragen können, nach CHODIN je nach der Länge der Linien $\frac{1}{61}$ bis $\frac{1}{9,5}$.

Alle diese Beobachtungen wurden mit bewegtem Blicke angestellt. Man kann bei solchen Versuchen bemerken, dass man nach einander den Blickpunkt bald in die Mitte der einen, bald in die der andern Strecke verlegt, sodass die Strecken, wenn sie parallel oder in derselben Linie liegen, nacheinander auf denselben Netzhautstellen abgebildet werden. Man überträgt also, um einen von HELMHOLTZ gebrauchten Vergleich anzuwenden, die betreffende Netzhautstrecke wie einen Zirkel nacheinander auf die eine und die andere Objectstrecke. Analog verfährt man, um den Parallelismus zweier Linien zu prüfen, indem man den Blick in der Mitte zwischen beiden Linien hingleiten lässt. Die Gleichheit zweier Winkel nimmt man, wie HELMHOLTZ erwähnt, am sichersten wahr, wenn ihre Schenkel parallel liegen, sodass man ihre Bilder nacheinander auf dieselbe Netzhautstelle bringen kann. An diesen Thatsachen zeigt sich auch, dass man diese Vergleichungen von Strecken nicht mit Hülfe etwaiger Muskelempfindungen oder Innervationsgefühle macht, welche uns über die Grösse des vom Blicke zurückgelegten Weges unterrichten

1 Vgl. hierüber FECHNER, Psychophysik II. S. 211. 1860 ferner dies. Handb. II. 2. Theil. S. 234, und CHODIN, Arch. f. Ophthalmologie XXIII. (1) S. 92. 1877.
2 HELMHOLTZ, Physiol. Optik S. 543.
3 WUNDT, Ztschr. f. rat. Med. (3) VII. S. 374. 1859.

könnten, sondern dass die Vergleichung mit Hülfe des Raumsinnes der Netzhaut geschieht, was übrigens nach den oben angeführten Thatsachen schon selbstverständlich ist.

Vergleicht man eine durch Punkte oder Striche getheilte Strecke oder Fläche mit einer gleichgrossen leeren, so sieht man, wie Hering [1] gefunden hat, erstere grösser als letztere. Das einfachste Beispiel hierfür bietet Fig. 57. Von zwei gleichgrossen Winkeln, deren einer

Fig. 57.

in kleinere Winkel getheilt ist, erscheint der letztere grösser. Zwei gleich grosse Quadrate erscheinen verschieden gross, wenn das eine mit einem rechtwinkligen Liniengitter bedeckt ist, und verschieden breit und hoch, wenn das eine durch verticale, das andere durch horizontale Linien getheilt ist, wie dies Fig. 58 zeigt, auf welcher



Fig. 58 (nach Helmholtz).

A und *B* genaue Quadrate sind. Versuchsreihen mit Messung der Grösse der Täuschung siehe bei Kundt [2], Aubert [3], Messer [4].

Da nicht untersucht ist, inwieweit die hier besprochenen Täuschungen sich auch bei ruhendem Blicke, bei Momentanbeleuchtung oder im Nachbilde zeigen, so konnten sie nicht den im II. Cap. erörterten Thatsachen angereiht werden. Ueber verschiedene Erklärungsversuche vergl. Hering, Kundt, Aubert und Helmholtz (ll. cc.).

Mach [5] theilte eine unveränderte horizontale Strecke von 10″ Länge in veränderlichem Verhältniss in zwei Abschnitte und bemühte sich, eine zweite daneben liegende gleichgrosse und ebenfalls horizontale Strecke in demselben Verhältniss zu theilen, und zwar bei binocularem Sehen. Er fand die in folgender Tabelle verzeichneten

1 Hering, Beiträge zur Physiologie I. § 24. 1861.
2 Kundt, Annal. d. Physik u. Chemie CXX. S. 118. 1863.
3 Aubert, Physiol. d. Netzhaut § 119. 1865.
4 Messer, Annal. d. Physik u. Chemie CLVII. S. 172. 1876.
5 Mach, Sitzgsber. d. Wiener Acad. 2. Abth. XLIII. Jan. 1861.

mittlen variablen Fehler, in welcher x die Länge des linken Abschnittes der getheilten Strecke in Linien, ξ den mittlen variablen Fehler bedeutet (nach Elimination des constanten Fehlers, den MACH nicht mitgetheilt hat).

x	ξ	x	ξ
0,5	0,01	6,0	0,14
1,0	0,04	7,0	0,07
2,0	0,07	8,0	0,06
3,0	0,07	9,0	0,03
4,0	0,13	9,5	0,01
5,0	0,21		

Die grossen Fehler bei $x = 5{,}0''$ rühren nach MACH daher, dass er nicht auf Halbirung achtete, sondern auf Gleichmachen der linkseitigen oder rechtseitigen Hälften der beiden Strecken. Er bediente sich nämlich als theilbarer Strecke eines horizontalen Schlitzes in einem Schirme, hinter welchem ein halb roth, halb grün gefärbter Schieber horizontal verschoben wurde, so dass die Grenzlinie der Farben den Schlitz in veränderlichem Verhältniss in einen rothen und einen grünen Abschnitt theilte.

MACH stellte ferner messende Versuche an über die Genauigkeit bei Vergleichung der Lage zweier Linien von begrenzter Länge, deren eine rechts, die andere links von der Medianebene im ebenen, etwas zum Horizont geneigten Gesichtsfelde lag. Zwei Scheiben, aus deren Mitte ein Faden entsprang, wurden nebeneinander gelegt, der eine Faden in beliebiger Lage befestigt und dann der Faden der anderen Scheibe bei binocularem Sehen möglichst in dieselbe (parallele) Lage gebracht. Als Normallage des Fadens diente die zur Medianebene parallele Lage. Die folgende Tabelle enthält den gefundenen mittlen variablen Fehler ψ. Der Winkel um welchen der erste Faden von der Normallage abwich, ist mit φ bezeichnet.

φ	ψ	φ	ψ
0°	0,2	50°	1,3
10°	0,6	60°	1,4
20°	1,2	70°	1,3
30°	1,1	80°	0,9
40°	1,2	90°	0,3
45°	1,3		

Es ergibt sich also die schon oben (S. 371) zu einer Erklärung beigezogene Thatsache, dass die verticalen und querhorizontalen

Linien am sichersten localisirt werden, Linien von beiläufig 45° Neigung am unsichersten. Hierbei ist zu bedenken, dass wegen der annähernd horizontalen Lage des Gesichtsfeldes der Winkel φ auf der Netzhaut andere Werthe hatte, als im Gesichtsfelde.

V. Das Sehen von Bewegungen.

Wenn sich ein Object in einem Gesichtsraume bewegt, dessen übriger Inhalt ruht, so zieht es unsre Aufmerksamkeit ganz besonders leicht auf sich, und wir pflegen es mit dem Blicke zu begleiten, wenn nicht unsre Aufmerksamkeit anderweit in ungewöhnlicher Weise gefesselt wird. Bilder auf den peripheren Theilen der Netzhaut, die wir sonst nur ausnahmsweise betrachten, drängen sich sofort ins Bewusstsein, wenn sie sich bewegen, und die Bilder kleiner, nicht sehr vom Grunde abstechender Objecte sehen wir mit den äussersten peripheren Theilen der Netzhaut überhaupt nur dann, wenn sie bewegt sind (Purkinje). Jede Aenderung einer Empfindung muss mit einer gewissen Geschwindigkeit stattfinden, wenn sie uns unmittelbar zum Bewusstsein kommen soll. Wie die Helligkeitszunahme eines Leuchtpunkts nur dann als solche empfunden wird, wenn sie schnell genug erfolgt, andernfalls aber zwar nachträglich erschlossen, nicht aber in ihrem Werden selbst gesehen werden kann, so muss auch die Aenderung des Raumwerthes und damit des Ortes einer Empfindung mit einer gewissen Geschwindigkeit erfolgen, wenn wir die Bewegung als solche sehen sollen. Andernfalls können wir zwar nachträglich bemerken, dass das Ding seinen Ort geändert, und daraus erschliessen, dass es sich bewegt hat, aber die Bewegung selbst können wir nicht sehen. Wir müssen daher streng unterscheiden zwischen der blossen Ueberzeugung von der Bewegung eines Dinges und der unmittelbaren Anschauung der Bewegung.[1] Erstere beruht auf Schlüssen, letztere auf dem unmittelbaren sinnlichen Eindrucke.

Will man im Sinne einer von Hering[2] aufgestellten Theorie des optischen Raumsinnes das Localisiren einer Empfindung als ein Empfinden des Ortes bezeichnen und also von Raumgefühlen- oder empfindungen sprechen, wie man von Ton- oder Farbenempfindung spricht, so muss man consequenter Weise auch Bewegungsgefühle- oder empfindungen annehmen, wie dies Exner[3] und Vierordt[4] später gethan haben.[5]

1 Czermak, Ideen zu einer Lehre vom Zeitsinn. Molesch. Unters. V.
2 Hering, Beiträge zur Physiologie V. § 124. 1864.
3 Exner, Sitzgsber. d. Wiener Acad. LXXII. 3. Abth. S. 156. 1875.
4 Vierordt, Ztschr. f. Biologie XII. S. 225. 1876.
5 In etwas anderem Sinne hat Mach den Ausdruck Bewegungsempfindung gebraucht. Vergl. Grundlinien d. Lehre v. d. Bewegungsempfindungen 1875.

Bestimmungen der kleinsten Geschwindigkeit, mit welcher die Raumwerthe einer Gesichtsempfindung sich ändern müssen, damit eine Bewegung derselben als solche gesehen oder empfunden werde, liegen nicht vor. Diese Minimalgeschwindigkeit hängt vor Allem davon ab, ob und in welcher Nähe von dem bewegten Dinge oder Punktcomplexe sich unbewegte Punkte oder Linien befinden. Denn man sieht das Wachsen einer Distanz zwischen zwei Punkten oder Linien um so leichter, je kleiner dieselbe unter sonst gleichen Umständen ist. Das langsame Dahinziehen einer Wolke am sonst blauen Himmel sieht man oft erst dann als Bewegung, wenn man ein unbewegtes Object zwischen sich und die Wolke bringt, und ein einziger isolirter leuchtender Punkt im sonst dunklen Raume muss sich viel rascher bewegen, um richtig bewegt gesehen zu werden, als ein Punkt auf einer mit zahlreichen fixen Punkten oder Linien versehenen Fläche.

Anderseits kann man bei zu grosser Geschwindigkeit der Bewegung die letztere wegen der Nachdauer der Erregung nicht sehen. So erscheinen uns die fallenden Regentropfen als Fäden, wenn wir die Augen ruhig halten. Bewegt man aber das Auge rasch in der Richtung des Bewegten, so kann man günstigen Falls das Bewegte und die Bewegung sehen und so z. B. den fallenden Regentropfen gleichsam im Fluge erhaschen.

Wenn nicht ein einzelnes Object, sondern ein grosser Theil der sichtbaren Dinge sich gleichzeitig und in demselben Sinne bewegt, so kann eine Täuschung derart eintreten, dass das Bewegte als ruhend und das Ruhende als bewegt gesehen wird. Betrachten wir z. B. die langsam vor dem Monde vorüberziehenden Wolken, so können wir, wenn wir nicht zugleich etwas feststehendes Irdisches beachten, den Mond als hinter den Wolken bewegt, letztere aber als feststehend sehen. Dazu gehört jedoch eine gewisse Langsamkeit der Bewegung, weil andernfalls die rasche Lageänderung der Wolken in Bezug auf unsern Standort bemerkt und so die Täuschung verhindert wird. Wir ersehen hieraus, dass wenn zwei Empfindungscomplexe des Sehraumes ihre Raumwerthe relativ zu einander ändern, diese Aenderung bisweilen statt auf den bewegten auf den ruhenden bezogen werden kann.

Sehr eindringlich sind derartige Täuschungen, wenn durch unsere eigene passive Bewegung eine Verschiebung fast des ganzen Netzhautbildes erzeugt wird. Betrachten wir, in einem festgeankerten Kahne sitzend, unbewegten Blickes die vorüberziehenden Wellen, so erhalten wir leicht den Eindruck, als ob die Wellen stehende wären

und der Kahn mit uns durch die Wellen zöge; im stehenden Eisenbahnwagen halten wir oft eine vorübergehende Wagenreihe für ruhend, den eigenen Wagen aber für bewegt, und was dergleichen bekannte Beispiele mehr sind. In allen solchen Fällen ändert der grössere Theil des Sehrauminhaltes seinen Raumwerth relativ zum übrigen Theile und ob diese Aenderung als eine Bewegung des einen oder anderen Theiles gesehen wird, hängt von Nebenumständen ab. Es ist bemerkenswerth, dass in solchen Fällen die Täuschung so zwingend sein kann, dass sie gegen unser besseres Wissen eintritt.

Sind zwei isolirte Punkte oder Striche sichtbar, deren einer sich von dem andern entfernt, und befinden sich in der Nähe keinerlei anderweite Merkzeichen, so sieht man meist nicht nur das wirklich bewegte Object in Bewegung, sondern leicht auch das benachbarte unbewegte und zwar dieses in entgegengesetzter Richtung; das sichtbare Wachsen des Abstandes der beiden Objecte wird also auch hier nicht ausschliesslich auf das bewegte Object, sondern zum Theil auf das unbewegte bezogen.

Hierher gehört eine von Helmholtz[1] gemachte Beobachtung. „Man ziehe auf einem Papier eine lange gerade Linie *A*, und bewege eine Spitze, welche man immer fixirt, in Richtung einer zweiten geraden Linie B, welche die erste unter einem sehr kleinen Winkel schneidet. Die zweite gerade Linie braucht nicht gezeichnet zu sein; doch schadet es auch nicht, wenn sie wirklich sichtbar gezogen wird. Wenn man der bewegten Spitze mit dem Blicke folgt, so scheint dabei die gerade Linie *A* auf dem Papier eine Bewegung gegen die Nadelspitze hin oder von ihr weg zu machen, je nachdem sich die Nadel ihr nähert oder von ihr entfernt. Das Bild der Linie A verschiebt sich dabei auf der Netzhaut theils parallel sich selbst, theils in Richtung der Breite. Die erstere Bewegung wird wenig oder gar nicht bemerkt, wenn die Linie lang ist und keine deutlich gezeichneten Merkpunkte besitzt; die zweite Bewegung senkrecht zu ihrer Länge wird dagegen desto deutlicher bemerkt.

„Dabei scheint auch die Richtung der Linie *A* verändert, und zwar so, dass der Winkel, den sie mit der Linie *B* macht, in der sich die Spitze bewegt, vergrössert erscheint. Das letztere erkennt man am besten, wenn man eine gerade Linie *a b* (Fig. 59) zieht, und eine Spitze eines Zirkels so auf das Papier aufsetzt, dass die andere sich in dem Bogen *c d e* hin und herbewegen kann. Wenn man dann dieser beweglichen Spitze mit dem Auge folgt, so scheint

1 Helmholtz l. c. S. 568.

die Linie *a b* sich abwärts zu bewegen so lange man die Zirkelspitze von *c* nach *d* gehen lässt, aufwärts wenn sie von *d* nach *c* geht. Gleichzeitig erhält die ganze Linie *a b* scheinbar eine Richtung wie *f g*, so lange sich der Blick des Beobachters der Spitze

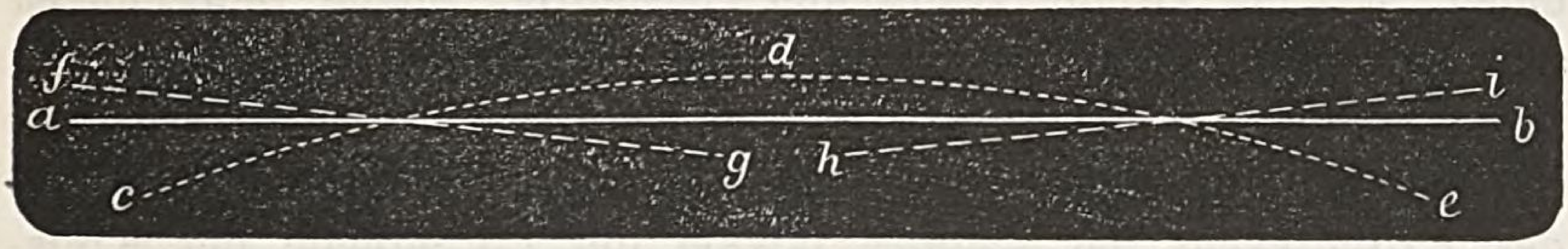


Fig. 59 (nach Helmholtz).

folgend längs *c d* bewegt, und eine Richtung wie *h i*, wenn er sich zwischen *d* und *e* bewegt. Während man bei der Bewegung von *c* nach *e* durch den höchsten Theil des Bogens bei *d* hindurchgeht, verändert die Linie *a b* deutlich ihre Richtung."

Da hiernach, wenn die Blickbahn eine Linie des Gesichtsfeldes schiefwinklig durchkreuzt, der schiefe Winkel falsch gesehen wird, so erklärt Helmholtz hieraus die von ihm gefundene Thatsache, dass die Täuschung, welche das S. 373 abgebildete Zöllner'sche Muster und ähnliche Figuren erzeugen, grösser ist, wenn man sie mit bewegtem Blicke als wenn man sie bei fester Fixirung oder bei Momentanbeleuchtung ansieht. Helmholtz identificirt also die blosse Bewegung des Blickpunktes mit der objectiven Bewegung der Spitze. Ebenso erklärt er die eigenthümliche Unruhe, in welche die Einzeltheile des Zöllner'schen Musters zu gerathen scheinen, wenn man den Blick darüber hinführt. Insoweit aber auch bei ruhendem Blicke schiefe Winkel noch falsch gesehen werden (vgl. S. 373), giebt Helmholtz dafür eine Erklärung, welche ebenso wie die von Zöllner [1] gegebene auf der Annahme einer rein psychischen Contrastwirkung gegründet ist. (Vergl. auch Cap. XIII.)

Wenn sich ein mit Punkten und Linien versehenes Object hinter einem Spalte vorbeibewegt, so dass man immer nur einen Theil des Objectes sieht, so kann man seine Grösse in der Richtung der Bewegung nur aus der Dauer und Geschwindigkeit der sichtbaren Bewegung seiner Einzelpunkte schätzen, wobei grosse Fehler derart begangen werden, dass man jene Grösse bei zu langsamer Bewegung meist überschätzt, bei zu schneller unterschätzt. Zöllner [2] schnitt in etwas steifes dunkles Papier einen Spalt von ungefähr 2 mm. Breite und 40 mm. Länge, zeichnete ferner auf weissem steifen Papier mit breiten und schwarzen Conturen einfache Figuren, z. B. einen Kreis oder ein Quadrat, und schob dieselben dicht hinter dem Spalte und senkrecht zur Richtung desselben schnell hin und her.

1 Zöllner, Annal. d. Physik u. Chemie CX. S. 500. 1860 u. CXIV. S. 587. 1861. Ueber die Natur der Kometen. S. 378. Leipzig 1872.

2 Derselbe, Annal. d. Physik u. Chemie CXVII. S. 477. 1862.

Dann sah er ein Zerrbild und zwar bei einer gewissen Grösse der Bewegung eine Verkürzung der Dimensionen in der Richtung der Bewegung, so dass z. B. ein Kreis als Ellipse erschien, deren kleine Axe in der Bewegungsrichtung lag. Die Augen Zöllner's führten dabei, wie ein zweiter Beobachter constatirte, kleine Bewegungen aus. Eine Verzerrung im entgegengesetzten Sinne fand Helmholtz [1] bei Wiederholung des Versuches, wenn der Kreis langsam hinter dem Spalte verschoben wurde, was er daraus erklärt, dass wegen des Falschsehens der schiefen Winkel die Einzeltheile der Kreislinie so gegen den Spalt geneigt erscheinen, wie in Wirklichkeit die Einzeltheile einer querliegenden Ellipse geneigt sein würden. Sorgt man mittels einer Marke an der Grenzlinie des Spaltes für ganz feste Fixirung, so ist die letztere Art der Verzerrung leicht zu beobachten, während die erstere nach Zöllner jetzt nur in einzelnen Fällen noch bemerklich ist. Es beruht dies darauf, dass durch die Geschwindigkeit der Bewegung die Auffassung der Einzeltheile des Bildes erschwert und durch das Nachklingen der Erregung auf der Netzhaut das Bild selbst verwischt wird. Zum Gelingen des Versuchs bei fester Fixirung gehört überhaupt immer, dass man erstens die Richtung der Bewegung des Objectes erkennt, was selbstverständlich ist, wenn man sie selbst mit der Hand hervorbringt, und zweitens, dass die successiv gesehenen Bruchstücke der Figur derart sind, dass sich die ganze Figur daraus reconstruiren lässt. Je grösser z. B. das jeweilig gesehene Bruchstück einer Kreislinie ist, desto leichter ist die Reconstruction. Ist der Spalt zu schmal, so sieht man nur schwarze Punkte in ihm auf- und ablaufen.

Bewegt man umgekehrt den Spalt sehr langsam dicht vor der ruhenden Figur vorüber, während man ersterem mit dem Blicke folgt, so sieht man wieder eine Ellipse, deren grosse Axe in der Richtung der Bewegung liegt. Bewegt man den Spalt rasch auf der ruhenden Figur hin und her, und gelingt es, dem Spalte mit dem Blicke zu folgen, so tritt die entgegengesetzte Verzerrung ein.

Wenn man den Spalt zu rasch bewegt, so dass man mit dem Blicke nicht folgen kann, sieht man den Kreis weniger verzerrt und um so richtiger, je ruhiger das Auge gehalten und je rascher der Spalt bewegt wird, was lediglich eine Folge der Nachdauer der Erregung ist.

Bewegt man endlich den Spalt und die Figur gleichzeitig aber in entgegengesetzter Richtung, so erscheint die Figur in der Richtung

1 Helmholtz l. c. S. 605.

der Bewegungen stark verkürzt, um so mehr, je rascher die Bewegung ist, eine Erscheinung, die zuerst PLATEAU[1] beschrieben und mit Hülfe zweier hintereinander liegenden und in entgegengesetzter Richtung rotirenden Scheiben demonstrirt hat, deren hintere die Figuren trägt, während die vordere einen radial gestellten Spalt hat. Dieser Apparat ist unter dem Namen Anorthoskop bekannt.[2] Die Täuschung lässt sich am besten an folgendem von ZÖLLNER (l. c.) mitgetheilten Schema erläutern.

Es möge sich auf einem Streifen *AB* (Fig. 60) eine Reihe gleichweit abstehender Punkte *a, b, c, d, e* befinden. Dicht über diesem Strei-

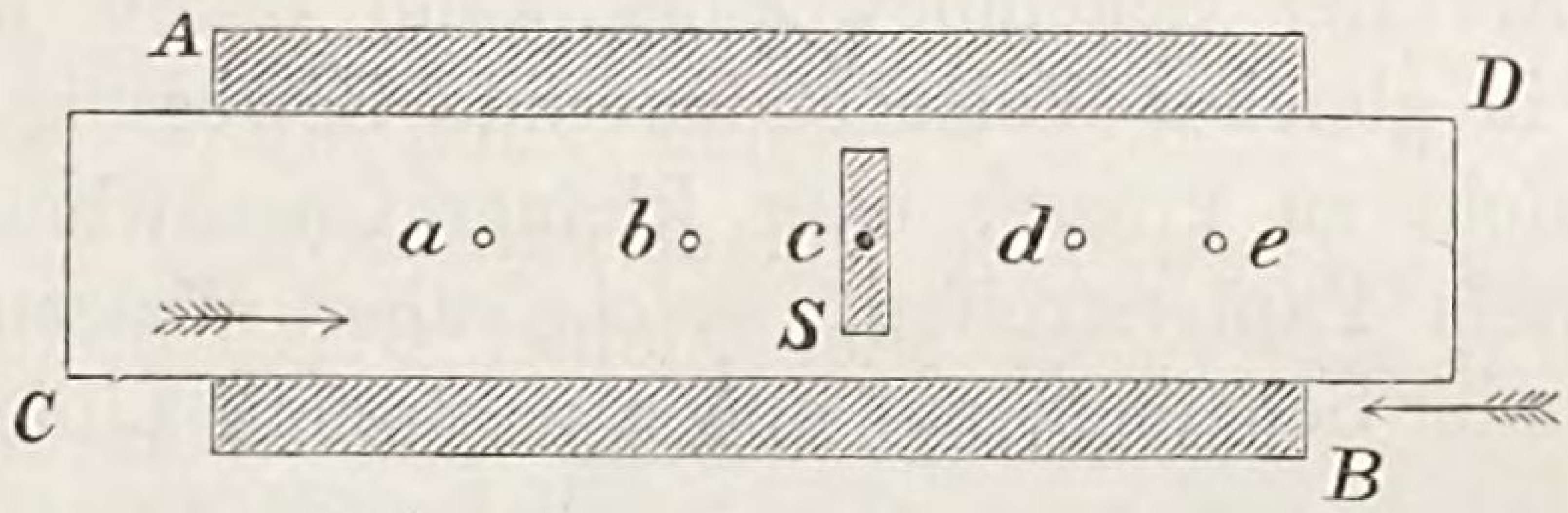


Fig. 60 (nach ZÖLLNER).

fen werde ein andrer Streif *CD* mit einem Spalt in der Richtung der Pfeile hin und her geschoben. Bleibt dabei der Streifen *AB* in Ruhe, so wird man die einzelnen Punkte der Reihe nach erblicken. Ist die Bewegung des Spaltes so schnell, dass die Zeit, welche er gebraucht, um von *a* bis *e* zu gelangen, kleiner ist als die Nachdauer der durch die Momentbilder der Punkte ausgelösten Netzhauterregung, so wird man die Punkte nicht mehr nacheinander, sondern gleichzeitig nebeneinander und in richtigem gegenseitigen Abstande sehen. Anders verhält es sich bei gleichzeitiger Bewegung der Punkte in entgegengesetzter Richtung. Man sieht dann, je nach der Grösse dieser Bewegung, die Punkte näher zusammengerückt, weil diesenfalls der Eindruck ganz derselbe sein muss, wie wenn die Punkte zwar ruhten, aber entsprechend näher aneinander gerückt wären.

Bei dem oben beschriebenen Versuche ZÖLLNER's, bei welchem nur die Figur rasch bewegt wurde, wird, wie HELMHOLTZ[3] meint, die Bewegung des Spaltes einigermaassen ersetzt durch Bewegungen der Augen; „der optische Eindruck ist hierbei derselbe, als ob der Spalt sich in entgegengesetzter Richtung wie das Auge bewegte, also auch entgegengesetzt dem bewegten Bilde", und hieraus ergiebt sich, ganz wie im Anorthoskop, eine scheinbare Verkürzung der Figur.

Wenn man längere Zeit die vorüberziehenden Wellen eines

1 PLATEAU, Annal. d. Physik und Chemie XXXVII. S. 464. 1836.
2 Ueber verschiedene Formen und die Theorie des Anorthoskops vergl. HELMHOLTZ, Physiol. Optik S. 352.
3 HELMHOLTZ, Physiol. Optik S. 605.

Stromes oder das herabstürzende Wasser eines Wasserfalles beobachtet, oder aus einem nicht allzurasch fahrenden Eisenbahnwagen auf die nächst der Bahn liegenden, scheinbar vorüberfliegenden Dinge geblickt hat, und man richtet dann die Augen auf einen ruhenden Gegenstand, z. B. den Weg oder den Boden des Wagens, so sieht man hier eine schwache Bewegung, welche der zuvor gesehenen entgegengesetzt ist. Arretirt man ein Kymographion, nachdem man längere Zeit das Entstehen der Curve beobachtet hat, so scheint die Trommel eine Zeit lang rückwärts zu laufen. Diese von PURKINJE [1] und PLATEAU [2] beschriebene, von OPPEL [3] und DVORAK [4] weiter untersuchte Art der Scheinbewegung kann durch jede beliebige, längere Zeit in gleicher Weise andauernde Bewegung der Netzhautbilder von nicht zu grosser oder kleiner Geschwindigkeit erzeugt werden. Mittels Papierstreifen, welche über Walzen gehen, oder mittels rotirender Scheiben, auf denen zahlreiche Linien oder Punkte angebracht sind, kann man alle möglichen Modificationen der Erscheinung herbeiführen. Um dieselbe ganz rein zu erhalten, hat man für gute Fixirung des Blickes zu sorgen (OPPEL).

Die Scheinbewegung ist immer an der Stelle des Sehfeldes localisirt, an welcher zuvor das bewegte Object erschien, und beruht also auf einer localen Reaction des Sehorganes gegen die vorangegangene Erregung. Fand die Bewegung nur in der einen Hälfte des Sehfeldes statt, so zeigt sich auch nachher die Scheinbewegung nur in dieser Hälfte. War die gesehene Bewegung in einem Theile des Sehfeldes rascher als im anderen, so ist auch die Scheinbewegung im ersteren rascher als im letzteren, war sie in einem Theile des Sehfeldes anders gerichtet als im anderen, so gilt das auch von der Scheinbewegung.

Zeichnet man nach PLATEAU auf eine Scheibe eine vom Centrum ausgehende Spirale und setzt die Scheibe in Rotation, so erhält man bei der einen Richtung der Drehung den Eindruck, als ob die Scheibe mit Kreisen bedeckt sei, welche aus der Mitte entstehend immer grösser werden, um schliesslich an der Peripherie zu verschwinden. Im Netzhautbilde findet dabei eine centrifugale Bewegung der Einzeltheile der Spirale statt. Blickt man nach längerer Fixirung der Scheibenmitte auf eine Druckschrift oder dergl., so sieht man an der entsprechenden Stelle eine centripetale, nach dem Blickpunkte ge-

1 PURKINJE. Medic. Jahrbüch. d. österr. Staates VI. 2. Stück. S. 96. 1820.
2 PLATEAU, Annal. d. Physik u. Chemie LXXX. S. 289. 1850.
3 OPPEL, ebenda XCIX. S. 540. 1856.
4 DVORAK, Sitzgsber. d. Wiener Acad. 2. Abth. LXI. S. 257. 1870.

richtete Bewegung der Buchstaben; betrachtet man das Gesicht eines Menschen, so scheint dasselbe zusammenzuschrumpfen und sich zu entfernen. Hatte man die Scheibe entgegengesetzt gedreht, wobei die scheinbaren Kreise auf der Scheibe fortwährend schrumpfen und im Centrum verschwinden, so sieht man nachher eine centrifugale Scheinbewegung, und ein betrachtetes Gesicht scheint sich zu vergrössern und näher zu kommen. Legt man, wie Dvorak that, auf eine grosse weisse Scheibe mit einer Spirale eine kleinere concentrische mit einer entgegengesetzt laufenden Spirale, auf diese etwa noch eine dritte, noch kleinere, mit einer der ersten gleichlaufenden Spirale und auf das gemeinschaftliche Centrum aller Scheiben einen kleinen schwarzen Kreis, fixirt während der Drehung fest den letzteren, und sieht nachher auf einen weissen lineirten Schirm, so erscheint auf demselben das dunkle Nachbild der Scheibe in drei theils schrumpfende, theils schwellende Ringe getheilt.

Nach fester Fixirung des Mittelpunktes einer mit radialen Linien versehenen langsam rotirenden Scheibe scheint das nachher betrachtete Object sich in entgegengesetzter Richtung um den fixirten Punkt zu drehen. Betrachtet man nach längerer Fixirung eines bewegten Objectes ein anderes bewegtes, so ergiebt sich nach Kleiner[1] unter Umständen aus der Bewegung des letzteren und der Scheinbewegung eine Bewegung in der Richtung der Resultirenden.

Joh. Müller suchte diese Scheinbewegungen durch die Annahme zu erklären, dass die Nachbilder der bewegten Objecte in derselben Reihenfolge nach einander verschwinden, wie sie entstanden sind.

Merkwürdige Angaben über die scheinbare Bewegung des Nachbildes bewegter Objecte, welches durch nur momentane Betrachtung der Objecte erzeugt war, hat Engelmann[2] gemacht.

Wir haben in diesem Capitel keinerlei Rücksicht genommen auf die Localisirung bei selbständiger activer Bewegung des Kopfes oder des ganzen Körpers. Nur in so weit Kopfbewegungen sich den Augenbewegungen associiren und also durch Blickbewegungen eingeleitet werden, sind sie berücksichtigt worden. Von diesen Bewegungen sind jene zu unterscheiden, welche nicht behufs der Blickbewegung ausgeführt werden, sondern deren Zweck die Locomotion des Kopfes oder des ganzen Körpers ist. Ihr Einfluss auf die optische Localisirung wäre Sache einer besonderen Untersuchung, die vielmehr in die Lehre vom Raumsinn überhaupt als in die Lehre vom Raumsinn des Auges gehört. Nur die Loca-

1 Kleiner, Arch. f. d. ges. Physiol. XVIII. S. 573. 1878.
2 Engelmann, Jenaische Ztschr. f. Med. u. Naturw. III. S. 443. 1867.

lisirung bei vorwärts oder rückwärts geneigtem Kopfe und horizontaler Blickebene wurde besprochen, weil die dabei stattfindende Abweichung der queren Mittelschnitte von der Blickebene die Gesetze der Localisirung in instructiver Weise erläutert.

Ferner wurde hier verzichtet auf die Erörterung der Compensationsbewegungen der Augen, wie sie bei den selbständigen Kopf- und Körperbewegungen eintreten, weil dieselben ohne eingehende Berücksichtigung des Gleichgewichtssinnes nicht besprochen werden können. Nur mit den parallelen Rollungen der Augen bei seitlicher Neigung des Kopfes haben wir deshalb eine Ausnahme gemacht, weil dieselben ein besonderes Licht werfen auf die Function der Augenmuskeln und auf die mechanischen Bedingungen der Augenbewegung nach Listing's Gesetz. Ueber andere Compensationsbewegungen vergleiche insbesondere Breuer[1]; über Localisirung bei ungewöhnlicher Kopfhaltung Aubert[2], Donders[3] und S. 584.

DREIZEHNTES CAPITEL.

Der Einfluss der Erfahrungsmotive auf die Localisirung.

Wir waren bei den bisher beschriebenen Versuchen meist bestrebt, Bedingungen herzustellen, unter welchen das Vorwissen der Lage und Anordnung der gesehenen Dinge und das Localisiren auf Grund der Erfahrung möglichst ausgeschlossen war. Dass der vollständige Ausschluss der Erfahrungsmotive undenkbar ist, wird allgemein anerkannt, und die folgenden Erörterungen werden dies nur bekräftigen können. Wo die Grenze zwischen Angeborenem und Erworbenem liegt, wissen wir nicht. Aber es scheint unzulässig, anzunehmen, dass die räumlichen Eigenschaften der Empfindungen und ihre Localisirung einzig und allein das Product der Erfahrung sind, einerseits weil viele neugeborne Thiere das Gegentheil direct erweisen, und nicht anzunehmen ist, dass der neugeborne Mensch sich in dieser Beziehung anders als nur graduell von den Thieren unterscheide; andrerseits weil Gesichtsempfindungen ohne alle räumliche Eigenschaften etwas Unfassbares sind. Einen Versuch, alles Räumliche der Gesichtsempfindung aus der Erfahrung abzuleiten, hat Helm-

1 Breuer, Wiener medicin. Jahrb. I. Heft 1874 und I. Heft 1875.
2 Aubert, Physiol. d. Netzhaut S. 275.
3 Donders bei Mulder, Arch. f. Ophthalmologie XXI. (1) S. 109. 1875.

holtz gemacht, während Joh. Müller die Höhen- und Breitenwerthe der Netzhautstelle als angeboren annahm und Hering diese Annahme auch auf die Tiefenwerthe ausdehnte.[1] Dass mit der Annahme angeborner Raumwerthe nicht gesagt ist, der Neugeborne localisire schon, wie der Erwachsene, bedarf kaum der Erwähnung.

I. Der Einfluss der Erfahrung im Allgemeinen.

Die Physiologie muss annehmen, dass jede Gesichtsempfindung nach Form und Qualität bedingt und getragen ist von einem im Sehorgane stattfindenden ganz besonderen, nur dieser Empfindung entsprechenden materiellen Processe, welcher ihr physisches Correlat ist. Gäbe es Empfindungen (Vorstellungen, Wahrnehmungen), welche kein physisches Correlat haben, so könnten dieselben kein Gegenstand physiologischer Betrachtung sein. Wird jener sogenannte psychophysische Process wie gewöhnlich durch die auf die Netzhaut fallenden Lichtstrahlen ausgelöst, so ist seine Art nicht bloss abhängig von der Art des Reizes, sondern auch von der Beschaffenheit des ganzen nervösen Apparates, welcher dem Sehorgan zugehört, und von dessen jeweiligem allgemeinen und localen Zustande, der sich als Stimmung desselben bezeichnen lässt; daher ein und derselbe Reiz je nach der Beschaffenheit und der Stimmung dieses Apparates sehr verschiedene Empfindungen auslösen kann.

Die Beschaffenheit des Nervenapparates ruht selbstverständlich im Wesentlichen auf angeborner Grundlage; aber die Gesammtheit der im Laufe des Lebens auf ihn theils unter Vermittlung der Augen theils auf andern Wegen einwirkenden Reize ist mitbedingend für seine weitere Entwicklung; oder anders ausgedrückt: die unwillkürliche und die willkürliche Erfahrung und Einübung haben mitbestimmenden Einfluss auf die materielle Beschaffenheit des nervösen Sehorganes und darum auch auf seine Function und insbesondere auf die Art, wie es auf das Netzhautbild als äusseren Reiz reagirt.

Dass Erfahrung und Einübung für das Sehorgan überhaupt möglich sind, beruht auf dem Reproductionsvermögen (Gedächtniss) seiner nervösen Substanz. Jede bestimmte Thätigkeit des Organes macht es zur Wiederholung eben derselben Thätigkeit geeigneter, daher immer leichtere Anstösse genügen, um es zur Reproduction derselben zu veranlassen. Wir können sagen, das Organ gewöhnt sich an be-

1 vergl. auch Stumpf, Ueber den physiologischen Ursprung der Raumvorstellung. Leipzig 1873.

stimmte oft wiederholte Thätigkeiten. Auf die Art oder den Inhalt dieser Gewöhnung kann unser Wille einen bestimmenden Einfluss ausüben. Wir vermögen willkürlich aus der Menge der in unser Bewusstsein tretenden Empfindungen einzelne gleichsam heraus zu greifen und festzuhalten, und wir nennen diesen, auf die Auswahl einzelner Empfindungen gerichteten Willen die Aufmerksamkeit. Die durch die Aufmerksamkeit begünstigte Empfindung gräbt gleichsam tiefere Spuren und lässt grössere Geneigtheit zur Reproduction zurück, als die nicht so deutlich und dauernd ins Bewusstsein gebrachte Empfindung. Wir können ferner willkürlich das Auge zur Reproduction gewisser Empfindungen zwingen, indem wir es wieder demselben äusseren Reize aussetzen. Endlich vermögen wir, eine wenn auch schwache und nur bei Einzelnen energischere Reproduction einer gehabten Empfindung nach Form und Qualität ohne Mithülfe des entsprechenden äusseren Reizes absichtlich herbeizuführen; diese nennen wir ein gewolltes Erinnerungsbild. Wenn die Empfindungen, welche dieses Erinnerungsbild zusammensetzen, nur schwache, gleichsam abgeblasste und dämmerhafte sind, bezeichnet man sie gewöhnlich als willkürliche Gesichtsvorstellungen; wenn sie sich aber bis zur vollen Kraft der sonst nur durch den äusseren Reiz aufgelösten Empfindung entwickeln, heissen sie willkürliche Phantasmen oder willkürliche Hallucinationen. Dieselben können mehr oder weniger getreue Reproductionen, oder aber neue Combinationen früher stattgehabter Empfindungscomplexe sein.

Ganz dasselbe, wie die gewollten Erinnerungsbilder, sind dem Wesen wenn auch nicht der Veranlassung nach die unwillkürlich ins Bewusstsein tretenden Erinnerungsbilder. Bestehen sie aus sehr schwachen Empfindungen, so heissen sie unwillkürliche Gesichts-Vorstellungen; sind sie aber aus Empfindungen von derselben Deutlichkeit und Eindringlichkeit zusammengesetzt, welche den durch die Netzhautbilder erzeugten Empfindungen eigen ist, und sind sie nach Form und Qualität getreue Reproductionen früherer, durch Netzhautbilder erweckter Empfindungen, so nennt man sie nach Fechner Bilder des Sinnengedächtnisses; treten sie krankhafter Weise, insbesondere im Delirium auf, so heissen sie, gleichviel ob sie getreue Reproductionen des früher Empfundenen sind oder aus neuen Combinationen früherer Empfindungen bestehen, unwillkürliche Gesichts-Hallucinationen. Treten sie endlich im Schlafe auf, so nennt man sie Traumbilder. Eine scharfe Grenze zwischen diesen, hier in besondere Gruppen gebrachten und

mit besondern Namen bezeichneten Erscheinungen lässt sich nicht ziehen; vielmehr lassen sich allenthalben Uebergänge aufweisen, welche man je nach Belieben der einen oder der andern Gruppe zuweisen kann. Alle haben das Gemeinsame, dass sie aus mehr oder minder schwachen oder lebhaften Empfindungen zusammengesetzt sind, welche entweder nach Form und Anordnung früheren Anschauungsbildern entsprechen, oder neue Gruppirungen einzelner Bestandtheile früherer Anschauungsbilder darstellen.

Die Thatsache, dass überhaupt Reproductionen früherer Empfindungscomplexe ohne das entsprechende Netzhautbild möglich sind, gibt uns den Beweis für die oben aufgestellte Behauptung, dass die Empfindungen oder vielmehr die ihnen entsprechenden psychophysischen Processe Spuren im nervösen Apparat zurücklassen, und dass der letztere durch den Process der Empfindung selbst eine wenn auch noch so geringe nachdauernde Aenderung erleidet, welche sich durch eine erhöhte Disposition zur Wiederholung desselben Processes und somit auch der entsprechenden Empfindung verräth. Den kräftigsten Anreiz zur Wiederholung eines und desselben Processes gibt nun offenbar die Wiederholung desselben Netzhautbildes. Aber das zweite Netzhautbild, welches dem ersten ganz gleich sein kann, bringt jetzt einen Apparat in Thätigkeit, der schon nicht mehr genau derselbe ist, welchen das erste Netzhautbild vorfand; und wäre auch das zweite Mal die durch das Netzhautbild ausgelöste Reaction des Nervenapparats nur äusserst wenig verstärkt, und die Empfindung entsprechend nur um ein sehr Kleines lebhafter, so müssten wir doch zugestehen, dass sie nicht mehr genau dieselbe ist, trotz der Gleichheit der Reize d. h. der Netzhautbilder. Gesetzten Falles nun, die Aufmerksamkeit hat sich beim erstmaligen Auftreten des durch ein bestimmtes Netzhautbild ausgelösten Empfindungscomplexes nur gewissen Theilen desselben vorwiegend zugewandt, so werden bei der Wiederholung desselben diese Theile trotz der Gleichheit des Reizes stärker reproducirt, und wenn sich dies hundertfach wiederholt, so wird die Ungleichheit der Energie, mit welcher die einzelnen Theile jenes Empfindungscomplexes ins Bewusstsein treten, immer grösser werden müssen.

Es ist nun nach dem jetzigen Stande unseres Wissens nicht zulässig, zu behaupten, dass beim erstmaligen wie beim letztmaligen Auftreten jenes Netzhautbildes genau dieselben reinen Empfindungen ausgelöst würden, dass sie aber das letzte Mal in Folge der Einübung oder Erfahrung etwas anders ausgelegt, zu einem etwas andern Anschauungsbilde verarbeitet würden wie das erste Mal. Denn

gegeben ist uns nur einerseits das Netzhautbild und das ist beidenfalls dasselbe, und anderseits der ausgelöste Empfindungscomplex, und der ist beide Male verschieden; von einem Dritten, nämlich einer zwischen Netzhautbild und Anschauungsbild als Wahrnehmung eingeschobenen reinen Empfindung wissen wir nichts. Wir können also, wenn wir jede Hypothese vermeiden wollen, nur sagen, dass der nervöse Apparat auf denselben Reiz das letzte Mal anders reagirt als das erste Mal, und dass dem entsprechend auch der entsprechende Empfindungscomplex verschieden ist.

Ebenso unbewiesen ist die Annahme, dass die sogenannte reine Empfindung in der Netzhaut, das daraus gestaltete Anschauungsbild oder die Gesichtsvorstellung im Gehirn erzeugt werde. Ist die psychophysische Substanz, an deren Veränderungen die bewussten Phänomene des Gesichtssinnes geknüpft sind, auf das Gehirn beschränkt, so kann in der Netzhaut keine Empfindung erzeugt werden, sondern nur ein, unserm Bewusstsein gänzlich entzogener Vorgang in der Nervensubstanz der Netzhaut, der nun seinerseits erst den entsprechenden psychophysischen Process im Gehirn auslöst. Erstreckt sich aber die psychophysische Substanz bis in die Netzhaut hinein, so lässt sich bis jetzt über ihren Antheil an der Herstellung der Empfindung nichts sagen, weil sich mit dem psychophysischen Processe der Netzhaut unausbleiblich der des Gehirnes verbindet, und die Empfindung als das gemeinschaftliche Erzeugniss beider Organe, oder als einheitliches Correlat des auf Netzhaut und Hirn vertheilten Processes ins Bewusstsein tritt und sich nicht in einen der Netzhaut angehörenden und einen dem Hirne zugehörigen Theil auflösen lässt. Dass nach Verlust der Augäpfel noch Gesichtsempfindungen vorkommen, ist erwiesen, dass aber, so lange die Augäpfel da sind, die Netzhaut nicht ein Theil der psychophysischen Substanz des Sehorgans sei, ist nicht erwiesen, wenn auch denkbar.

Aber nicht bloss bei Wiederholungen desselben Netzhautbildes macht sich die mit der Zahl der Wiederholungen gesteigerte Neigung zur Reproduction geltend, sondern auch bei Netzhautbildern, welche den früher oftmals aufgetretenen nur ähnlich sind. Aehnlichkeit besteht in theilweiser Gleichheit. Ein späteres, dem früheren ähnliches Netzhautbild wird also für diejenigen Theile, welche beiden Netzhautbildern gemeinsam sind, gleichsam stärkeren Anklang im Nervenapparat finden, als für die übrigen Theile. Hierauf beruht es, dass die Reproduction meist eine elective ist; denn die stärker anklingenden Theile des Netzhautbildes lösen vergleichsweise kräftigere Empfindungen aus, als die übrigen Theile. Dies kann dazu führen, dass letztere ganz übersehen und für die Anschauung gleichsam eliminirt werden. Ja es können sogar an Stelle dieser durch Election eliminirten Empfindungen ganz andere Empfindungen treten, die dem

äusseren Reize nicht entsprechen. Ein Empfindungscomplex nämlich, für welchen wegen häufiger Wiederholung des entsprechenden Netzhautbildes eine starke Neigung zur Reproduction im Nervenapparate besteht, wird leicht auch dann vollständig reproducirt, wenn nicht das ganze Netzhautbild, sondern nur ein wesentlicher Theil desselben wiederkehrt. Diesenfalls treten also theilweise Empfindungen ein, welchen im Netzhautbilde kein zugehöriger Reiz entspricht, sondern welche ihr Entstehen einzig und allein dem Reproductionsvermögen des Nervenapparats verdanken. Dies ist die ergänzende Reproduction.

So genügen einige wenige Punkte und unzusammenhängende Striche, um uns das Abbild eines menschlichen Gesichts erscheinen zu lassen, und wir bemerken ohne besonders darauf gerichtete Aufmerksamkeit nicht, dass wir dabei Manches sehen, was gar nicht auf dem Papier verzeichnet ist. Durchmustern wir freilich die Zeichnung aufmerksam, so finden wir, dass stellenweise die Umrisse fehlen, die wir anfangs thatsächlich sahen. Dieses wirkliche Sehen von etwas, dem im Netzhautbilde nichts entspricht, das vielmehr eine durch Reproduction entstandene Zuthat unseres Nervenapparates bildet, ist im Wesentlichen dasselbe, was man, wenn es krankhafter Weise sehr stark entwickelt auftritt, als Sinnesillusion bezeichnet.

Es ist dabei nicht zu vergessen, dass es sich hier um eine wirklich sinnliche, d. h. aus deutlichen Empfindungen bestehende Illusion handelt, nicht blos um eine Irrthumsillusion in Folge falschen Urtheils. Wenn ich eine ganz naturgetreu ausgeführte Wachsfigur im ersten Augenblicke für einen wirklichen Menschen halte, so ist dies keine Sinnesillusion, sondern ein Irrthum. Wenn ich aber auf einem Oelgemälde eine kleine menschliche Figur mit mancherlei Einzelheiten sehe, welchen letzteren bei genauerer Musterung in den wenigen Farbenklexen auf der Leinwand zum Theil gar nichts entspricht, so ist das Sehen dieser in Wirklichkeit nicht vorhandenen Einzelheiten eine Sinnesillusion. Da sich in den verschiedensten Netzhautbildern im Grunde immer wieder dieselben Einzelheiten, nur in verschiedener Zusammensetzung und Gruppirung, wiederholen, so sind solche auf ergänzender Reproduction beruhende subjective Zuthaten etwas sehr Gewöhnliches.

Die durch ergänzende Reproduction hinzugekommenen Theile des Empfindungscomplexes beruhen aber ebenso wie dessen übrige Theile, auf einer wenn auch mehr indirecten Reaction des Nervenapparates gegen das Netzhautbild und so lange sie da sind, können wir sie eben auch als Empfindungen bezeichnen, denn sie unterscheiden sich während ihres Bestehens in Nichts von den Empfindungen, welchen im Netzhautbilde ein wirklicher Reiz entspricht. Dagegen ist

Thatsache, dass sie häufig nicht beständig sind, und dass sich viele derselben durch strengere Aufmerksamkeit beseitigen lassen; aber es ist nicht erweislich, dass dies bei allen möglich ist.

Ebenso wie die Qualität der Gesichtsempfindungen wird die Form derselben und ihr Ort im Sehraum von dem Reproductionsvermögen des Nervenapparates mit bestimmt. Beim Sehen mit nur einem Auge, wobei die Verschiedenheit der beiden Netzhautbilder die Anordnung der Sehdinge nach der Tiefendimension nicht mit bestimmen kann, ist die Vertheilung derselben nach der Tiefe sogar im Wesentlichen allein das Werk dieses Reproductionsvermögens, also die Folge früherer Erfahrungen. Das undeutliche Netzhautbild einer nahe vor den Augen schwebenden Fliege kann im ersten Augenblicke das Bild eines grossen in der Ferne befindlichen Vogels zur Reproduction bringen, während im nächsten Augenblicke schon das Bild einer kleinen Fliege entsteht, weil irgend eine Veränderung des Netzhautbildes oder ein Nebenumstand wie z. B. das Summen der Fliege die entsprechende Reproduction auslösen hilft.

Wenn eine gewisse Art der Localisation eines bestimmten Empfindungscomplexes dem Nervenapparate einmal zur anderen Natur geworden ist, so kann unser besseres Wissen, sowie Urtheil und Schluss meist nichts mehr daran ändern. Wir haben schon oben bei Besprechung der Sehrichtung Beispiele dafür anzuführen gehabt. Es gibt gewisse Manieren, die Gesichtsempfindungen zu localisiren, welche nachweisbar auf Angewöhnung beruhen, weil sie eben nur bei denen sich finden, welchen diese Art der Angewöhnung durch ihren Beruf oder durch eine Anomalie ihres Körpers, z. B. durch Einäugigkeit oder einen schiefen Hals geboten war. Man ist gleichwohl später nicht im Stande an der gewohnten Art der Localisirung, weil sie zu einem Zwange geworden ist, etwas zu ändern, und zwar auch dann nicht, wenn man weiss, dass die Localisirung falsch ist.

In Wirklichkeit verschiedene Dinge können sehr ähnliche, manchmal nahezu gleiche Netzhautbilder geben, z. B. ein nach drei Dimensionen ausgedehnter Gegenstand und sein ebenes perspectivisches Bild. Solchenfalls hängt es oft von kleinen Zufälligkeiten, und insbesondere auch von unserem Willen ab, ob der eine oder der andere Empfindungscomplex ausgelöst wird. Hierbei kann nun wirklich durch Urtheile und Schlüsse bestimmend auf die Art der Empfindung, insbesondere auf ihre Form eingewirkt werden.

Man kann ein Relief vertieft als die entsprechende Matrize sehen und umgekehrt; denn ein von links beleuchtetes Relief kann genau dasselbe Netzhautbild geben, wie seine von rechts beleuchtete Matrize.

Bedenkt man dies aber, so wird man aus der Richtung des einfallenden Lichtes schliessen können, dass man ein Relief vor sich hat und die eintretende Vorstellung des Reliefs lenkt sofort die Thätigkeit des Nervenapparats in die richtige Bahn, das Anschauungsbild des Reliefs wird plötzlich ausgelöst. Oder wir verschaffen uns durch den Tastsinn oder auf irgend welche andere Weise die Ueberzeugung von dem Vorhandensein des Reliefs.

In allen Fällen, wo das Netzhautbild derart ist, dass dem Nervenapparate zwei verschiedene Arten der Reaction sozusagen gleich oder nahezu gleich nahe liegen, muss es von kleinen Zufälligkeiten abhängen, ob die eine oder die andere Art der Reaction wirklich eintritt. Hier kann also auch unser auf anderweitem Wege gewonnenes Wissen entscheidend wirken und der richtigen Anschauung zum Siege verhelfen. Die blosse Vorstellung des Richtigen ist ja selbst schon eine schwache Reproduction, welche nun mit Hülfe des zu ihr passenden Netzhautbildes sich zu deutlicher und lebhafter Empfindung entwickelt.

Besteht aber nicht schon im Nervenapparat selbst eine Disposition zur Erzeugung desjenigen Anschauungsbildes, welches nach unserem Urtheile das der Wirklichkeit entsprechende ist, so kann auch unser besseres Wissen nicht den richtigen Empfindungscomplex heraufbeschwören; wir wissen dann zwar, dass wir etwas der Wirklichkeit nicht Entsprechendes sehen, aber wir sehen es doch.

Das reproductive Vermögen des Sehorganes ist für die, den verschiedenen Stellen des Sehfeldes entsprechenden Einzeltheile desselben sehr verschiedenartig entwickelt. Nicht alle Theile der Sehsubstanz haben so zu sagen dieselbe Ausbildung, sondern der eine ist für Dies, der andere für Jenes besser abgerichtet. Kurz gesagt, das Reproductionsvermögen ist ein localisirtes. Man nehme die wohlgetroffene Photographie eines Menschen, verdecke sie bis auf das Gesicht, so dass ausser letzterem das Kopfhaar und die Kleidung höchstens theilweise sichtbar sind, halte sie verkehrt und zeige sie so seinen besten Freunden: keiner wird das Bild sogleich erkennen, die meisten überhaupt gar nicht. Zur schnellen und sicheren Reproduction eines uns wohlbekannten Gesichtes gehört eben auch, dass wir dieselbe von denjenigen Theilen der Sehsubstanz besorgen lassen, welche dafür besonders erzogen sind. Man betrachte eine Landschaft, indem man mit nach unten gerichtetem Kopfe durch die gespreizten Beine sieht, oder man kehre das Bild der Landschaft, wie Helmholtz that, mittelst eines Reversionsprismas um, mache aber den Versuch nicht, wie Helmholtz, binocular, sondern nur mit einem

Auge, und man wird die Landschaft völlig verändert finden. Alles Ferne scheint näher gerückt, die Ebene scheint nach der Ferne rasch anzusteigen, alle Farben sind energischer und das Ganze gleicht viel mehr einem Gemälde, als dies beim gewöhnlichen Sehen mit einem Auge der Fall ist.

Dass wir überhaupt die auf den oberen Theilen der Netzhaut liegenden Bilder mit Vorliebe näher, die auf den untern befindlichen ferner localisiren, ist wohl ebenfalls nur die Folge der localisirten Gewöhnung.

II. Einfluss der Erfahrungsmotive auf die allgemeinen räumlichen Eigenschaften der Gesichtsempfindungen.

Da die Netzhautbilder flächenhaft sind, hat man sich gewöhnt, anzunehmen, dass auch die Gesichtsempfindungen ursprünglich nur nach zwei Dimensionen localisirt werden und dass erst später die dritte Dimension hinzutrete. Abgesehen davon, dass wir uns eine Fläche ohne den Raum, welchen sie theilt, nicht vorstellen können, und dass also die Vorstellung des nach drei Dimensionen ausgedehnten Raumes die Vorbedingung für die Vorstellung der Fläche ist, liegt auch darin, dass das Netzhautbild flächenhaft ist, keinerlei zureichender Grund für obige Annahme. Dieselbe hat zur weiteren Folge gehabt, dass man auch für den erwachsenen Menschen nur flächenhafte, wenngleich in verschiedener Entfernung liegende Gesichtsempfindungen annahm.

HERING[1] hat dagegen die Ansicht aufgestellt, dass die Gesichtsempfindung von Anfang an eine dreidimensionale oder raumhafte sei. Dem entspricht die Thatsache, dass auch der Erwachsene neben flächenhaften Gesichtsempfindungen fortwährend raumhafte hat. Man muss also betreffs der allgemeinen räumlichen Eigenschaften der Empfindung raumhafte und flächenhafte, sowie bestimmt und unbestimmt begrenzte Empfindungen unterscheiden. Das Dunkel, welches man bei geschlossenem Auge vor sich sieht, ist z. B. eine raumhafte Empfindung; man sieht nicht eine schwarze Fläche, wie eine Wand, vor sich, sondern einen mit Dunkel erfüllten Raum, und selbst wenn es gelingt, diesen Dunkelraum als durch eine schwarze Wand begrenzt zu sehen, so bleibt doch vor dieser Wand immer noch ein Dunkles. Ganz dasselbe ist der Fall, wenn man sich offenen Auges in einem absolut dunklen Raume befindet. Diese Dunkelempfindung ist zu-

1 HERING, Beiträge zur Physiologie V. S. 186.

gleich unbestimmt begrenzt. Ein Beispiel für eine bestimmt begrenzte raumhafte Empfindung gibt jede in einem Glase gesehene farbige und klare Flüssigkeit; man sieht das Gelb des Weines nicht bloss an der umschliessenden Fläche des Glases, sondern die gelbe Empfindung füllt das ganze Innere des Glases. Bei Tage sieht man den sogenannten leeren Raum zwischen sich und den Sehdingen ganz anders als bei Nacht. Die zunehmende Dunkelheit legt sich nicht bloss auf die Dinge, sondern auch zwischen uns und die Dinge, um sie endlich ganz zu verdecken und allein den Raum zu füllen. Blicke ich in einen dunklen Kasten, so sehe ich denselben vom Dunkel erfüllt, und dasselbe wird nicht blos als dunkle Farbe der Wände des Kastens gesehen. Eine schattige Ecke in einem sonst hellen Zimmer ist voll von einem Dunklen, welches nicht blos in den Grenzflächen der Ecke, sondern in dem von ihnen begrenzten Raum localisirt ist. Jede Empfindung ist da, wo ich sie habe, und habe ich sie zugleich an allen Punkten eines Raumstückes, so ist sie eben eine raumhafte Empfindung. Ein Würfel von durchsichtigem grünen Glase giebt uns eine raumhafte Empfindung, ein undurchsichtiger grün angestrichener Würfel dagegen nur flächenhafte Empfindungen. Dass die sichtbaren Flächen des letzteren nicht in einer, sondern in verschiedenen Ebenen des Sehraumes erscheinen, ändert nichts an der Thatsache, dass die grünen Empfindungen, aus welchen das Anschauungsbild dieses Würfels besteht, nur flächenhaft sind.

Gesichtsempfindungen, die nicht entweder nach drei oder wenigstens nach zwei Dimensionen ausgedehnt wären, giebt es nicht; der kleinste, leuchtende oder dunkle Fleck und der feinste Strich haben noch mindestens Fläche. Nur die Grenzlinie zweier flächenhaften Empfindungen ist eine lediglich nach einer Dimension ausgedehnte mathematische Linie, und nur der Punkt, wo zwei solche Grenzlinien zusammenstossen oder sich durchschneiden, ist ohne jede Ausdehnung.

Bedeckt man einen innen geschwärzten, oben offenen Kasten mit einem weissen Carton, in welchen man ein mit zackigen Rändern versehenes Loch geschnitten hat, so sind zwei Fälle möglich: entweder man sieht ein Loch im Carton und hinter der Ebene des Loches einen dunklen Raum, oder man sieht auf dem weissen Carton einen schwarzen Fleck von der Form des Loches. Beidenfalls ist die Empfindung ganz verschieden. Im ersten Falle nämlich ist die Empfindung des Dunkels eine raumhafte, nach der Tiefe ausgebreitete, im andern Falle ist die Empfindung des Schwarzen eine flächenhafte; das Dunkel ist dann gleichsam in eine Fläche zusammengedrängt und erscheint als Flächenfarbe. Der Unterschied ist, wenn der Ver-

such gelingt, ein ganz auffallender. Ausserdem sieht man erstenfalls die Zacken des Randes als vorspringende Theile des weissen Cartons, letzternfalls als vorspringende Theile des schwarzen Fleckes. Da das Netzhautbild beidenfalls genau dasselbe ist, so beruht hier die räumliche Verschiedenheit der ausgelösten Empfindungen lediglich darauf, dass einmal die eine, ein andermal die andere Reproduction die Form der Empfindungen bestimmt.

Lassen wir auf eine Papierfläche einen kleinen begrenzten Schatten fallen, so sehen wir denselben als ein Dunkles auf dem Papiere, aber nicht als graue Farbe; wir sagen dementsprechend: der Schatten liegt auf dem Papiere. Ganz anders erscheint uns ein graugefärbter Fleck; wir sagen dann, das Papier ist an dieser Stelle grau. Die Art, Stärke und Vertheilung des objectiven Lichtes können in beiden Fällen genau dieselben sein, es kommt nur darauf an, ob die Nebenumstände die eine oder andere Art der Reproduction begünstigen. Man kann den begrenzten Schatten leicht als graue Farbe des Papiers sehen, wenn man ihn mit einem dicken schwarzen Striche umgiebt, welcher das, was für den Schatten charakteristisch ist, nämlich seine zarten Uebergänge in das Weiss des Papiers, vollständig verdeckt. Dann sieht man in frappanter Weise das Papier grau gefärbt. Dass dabei der Contrast nicht das Wesentliche ist, zeigt sich sofort, wenn man den schattenwerfenden Körper ein wenig bewegt, so dass seine Ränder über den schwarzen Strich hinausfallen; dann schwindet sofort die graue Farbe und man sieht wieder den Schatten. Ganz analoge Versuche kann man in noch überraschenderer Weise mit kleinen Stücken farbigen Glases machen, welche farbige Schatten werfen. Anfangs sieht man ein farbiges Dunkel auf dem Papiere, nach der Umrandung mit dem schwarzen Strich aber ein Stück farbiges Papier.

Begrenzte Lichter, die auf beschattete oder dunkelfarbige Flächen fallen, werden von uns im ersten Augenblicke oft für weissliche Flecken gehalten; ebenso erscheinen uns farbige Lichter, welche durch kleine farbig verglaste Oeffnungen auf den Fussboden oder die Wand eines mässig erleuchteten Raumes geworfen werden, bisweilen als farbige Flecke. Alle diese Täuschungen kann man künstlich und besonders durch die beschriebene Umrandung in viel zwingenderer Weise herbeiführen.

Solche Lichter und Schatten haben also das Eigenthümliche, dass sie als etwas der Fläche Aufliegendes gesehen werden. Es tritt hier eine Art Spaltung der Empfindung ein. Gesetzt die Schatten oder Lichter fallen auf farbiges Papier, so sehen wir das Papier farbig

und darauf oder davor ein Dunkles oder Helles. Oder es liegt ein blaues Licht auf einer weissen Fläche, so sehen wir ein Weissliches hinter einem aufliegenden blauen Hellen. Sobald aber die, den wirklichen Schatten oder Lichtern entsprechende Empfindung ganz in die Oberfläche des Papiers zusammengedrängt wird, erscheint sie als Flächenfarbe.

In grösserem Maasstabe wiederholen sich die hier erörterten Erscheinungen, wenn in einem sonst hellen Zimmer auf einen Theil der Dinge directes Sonnenlicht fällt, oder die durch die Wolken brechende Sonne einzelne Stellen einer Landschaft heller beleuchtet; ebenso wenn einzelne Theile eines hellen Zimmers beschattet sind oder über eine sonnige Landschaft der begrenzte Schatten einer Wolke zieht. Denn die besonnten Stellen, welche uns mehr, oder die beschatteten Stellen, welche uns weniger Licht ins Auge senden, als durchschnittlich alles Uebrige, sehen wir dann nicht etwa als hellfarbige oder dunkelfarbige Dinge, sondern wir sehen das Licht und den Schatten auf und vor den Dingen liegen und dahinter die farbigen Flächen, deren Farbenton wir durch das Licht oder Schattige hindurch sehen.

Wird etwas heller empfunden als die reinweissen Dinge bei derselben Beleuchtung, und kann den gegebenen Umständen nach die grössere Helle nicht als ein aufgeworfenes Licht aufgefasst werden, so sehen wir es leuchtend oder glänzend. Flammen und glühende Körper leuchten. Die leuchtende Empfindung hat ebenfalls etwas Raumhaftes im Vergleich zu den streng flächenhaften Körperfarben. Ein glühendes Eisen wird durch und durch leuchtend gesehen, ebenso eine Flamme. Bringen wir rothglühendes Eisen an die Sonne, so kann es unter Umständen als ein Körper mit rother Oberflächenfarbe erscheinen; dies ist unmöglich, wenn es heller ist, als die hellste Oberflächenfarbe der umliegenden Dinge. Dagegen kann umgekehrt ein glühendes Eisen als selbstleuchtend gesehen werden, wenngleich es nicht heller ist, als eine reine weisse Oberflächenfarbe bei derselben Beleuchtung; dann ist aber die Empfindung raumhaft und das Roth des Eisens wird nicht blos an seiner Oberfläche als Flächenfarbe gesehen, sondern es erstreckt sich in die Tiefe desselben.

Den leuchtenden Körpern stehen am nächsten die metallisch- und die seidenglänzenden. Auch hier handelt es sich um Empfindungen, die heller sind als reinweisse Körperfarbe. Auf einer ganz gleichmässig metallisch- oder seidenglänzenden Fläche sehen wir nicht blos Flächenfarbe, sondern zugleich Licht als solches. Gleichmässig ausgebreiteter Glanz ist übrigens bei spiegelnden Me-

tallflächen selten, dagegen bei sogenannten mattglänzenden ganz gewöhnlich.

Von dem Glanze, welcher lediglich auf der grossen Helligkeit der Empfindung beruht und welcher ebenso den selbstleuchtenden Dingen zukommt, als denen, welche sehr intensives zerstreutes Licht zurückwerfen, ist der Glanz zu unterscheiden, welcher sich an unregelmässig oder unvollkommen spiegelnden Flächen zeigt. Bei der ersten Art des Glanzes handelt es sich, wenn sie sich ausschliesslich geltend macht, immer nur darum, dass auf einer Fläche oder in einem Körper gleichsam ein Ueberschuss von Licht gesehen wird, der als ein Helles für sich und daher nicht als Körperfarbe aufgefasst wird; bei der letzteren Art des Glanzes kommt es darauf an, dass die durch unvollkommene Spiegelung entstehenden farbigen oder farblosen Lichter oder Dunkelheiten als von der Oberflächenfarbe gesondert gesehen werden. Auf einer glänzenden Fläche wechseln dunkle und lichte Stellen mannigfaltig ab, wie dies auch auf einer nicht glänzenden Fläche der Fall sein kann. Soll sich Glanz zeigen, so muss eine Spaltung der Empfindung eintreten, bei welcher ein Theil der Empfindung in die Fläche als deren wesentliche Farbe, andere Theile aber als zufälliges auf oder vor der Fläche liegendes oder aus der Tiefe des Körpers kommendes Licht oder Dunkel gesehen werden.

Die Sonderung der wesentlichen Farbe vom zufälligen Licht oder Dunkel wird ausserordentlich durch jede Bewegung des glänzenden Gegenstandes oder, wie gewöhnlich, durch Bewegungen unsers Körpers begünstigt, denn die lichten und dunklen Stellen ändern dabei ihren Platz und verschieben sich entweder auf der Fläche oder werden hinter oder vor derselben localisirt. Durch das Binocularsehen und insbesondere auch durch Aenderung des Convergenzwinkels der Gesichtslinien wird jene Sonderung ebenfalls sehr erleichtert. Erstens nämlich erfährt die eine Netzhaut an vielen Stellen eine ganz andere Lichtwirkung als die correspondirende Stelle der andern, so dass hier schon von vornherein durch den Wettstreit zwei Empfindungen gegeben sind und nicht erst gleichsam durch Spaltung erzeugt zu werden brauchen. Zweitens haben die unvollkommenen und nicht als eigentliche Spiegelbilder erkennbaren Reflexbilder je nach der Form der Fläche ihren optischen Ort hinter oder vor der Fläche und werden auf Grund der Disparation ihrer Netzhautbilder und der Convergenzänderungen entsprechend localisirt, so dass hier eine räumliche Sonderung des als Körperfarbe gesehenen Theils der Empfindung von dem zufälligen Licht und Dunkel noch viel handgreiflicher ist, als in andern Fällen. Starke Contraste begünstigen sehr die Ent-

stehung des Glanzes, weil sie die hellen Stellen noch heller machen und oft über die Helligkeit der hellsten Körperfarben hinausrücken; aber eine unerlässliche Bedingung bilden solche Contraste nicht.

Die Maler imitiren das Leuchten und den Glanz dadurch, dass sie starke Lichter auf eine im Uebrigen dunkel gehaltene Umgebung aufsetzen. Auch sonst lässt sich insbesondere der Glanz leicht experimentell auf nicht glänzenden Flächen herstellen. Man berusse z. B. eine grosse Glasplatte, lege sie auf eine weisse Unterlage und erzeuge auf ihr durch entsprechende Entfernung des Russes so gut als möglich das Bild eines glänzenden Gegenstandes, oder stelle dasselbe als Negativ mit schwarzer Tusche her. Dieses Bild wird zunächst nicht glänzen. Wenn man aber die Glasplatte als Fenster für einen kleinen Dunkelraum benutzt, hinter die Platte in passender Entfernung ein Licht stellt und die durchfallenden Strahlen auf einer weissen Fläche auffängt, so kann man auf derselben ein glänzendes Bild des Gegenstandes erhalten.

Man stelle eine unbelegte Spiegelplatte senkrecht auf den Tisch, lege hinter dieselbe ein Stück weisses oder farbiges Papier, und vor dieselbe ein kleines Stück andersfarbiges Papier; wenn nun das Spiegelbild des vordern Papiers nicht genau in die Fläche des hintern Papiers fällt, insbesondere wenn man die Spiegelplatte etwas bewegt, so erscheint die eine Fläche glänzend, weil eine Spaltung der Empfindung derart eintritt, dass dieselbe theils in einer nähern, theils in einer fernern Fläche gesehen wird. Es ist, als wäre die jeweilige fernere Fläche durch eine Spiegelung seitens der näheren sichtbar geworden. Diese Methode, Glanz zu erzeugen, die auch bei einäugigem Sehen zum Ziele führt, ist von Wundt angegeben worden. Dove fand, dass wenn zwei an entsprechenden Stellen verschiedenfarbige oder verschieden helle Zeichnungen, wie z. B. Fig. 29 (S. 429) unter das Stereoskop gelegt werden, die Flächen der stereoskopischen Figur zu glänzen scheinen. Schwarz und Weiss geben dabei einen Glanz wie Graphit. Ueberhaupt tritt bei jedem Wettstreit der Sehfelder sehr leicht Glanz auf, weil eine wesentliche Bedingung desselben, nämlich die Spaltung der Gesammtempfindung in zwei Theile hier von vornherein gegeben ist (vergl. das folg. Cap.).[1]

1 Die ziemlich umfangreiche Literatur über den Glanz siehe bei Helmholtz, Physiol. Optik S. 794.

III. Einfluss der Erfahrung auf Gestalt und Ort der Empfindungen.

Befinden sich die gesehenen Aussendinge in grosser Entfernung, so entwerfen sie auf beiden, als eben oder sphärisch gedachten Netzhäuten geometrisch congruente Bilder, welche, wenn Parallelismus der Mittelschnitte und keine Netzhautincongruenz bestände, zugleich durchaus correspondirend liegen würden. Bei Netzhautincongruenz ergibt sich zwar eine geringe quere Disparation für die Bilder fast aller Punkte, aber dieselbe ist derart, dass sie nur auf die Neigung derjenigen Ebene (oder vielleicht schwach gekrümmten Fläche) Einfluss nehmen könnte, in welcher auf Grund der Raumwerthe der Netzhautstellen alle fernen Objecte erscheinen würden, wenn keinerlei anderweitige Motive die Localisirung nach der Tiefe mit bestimmten. Derartige Motive ergeben sich aber sehr zahlreich aus der Erfahrung, und durch sie geschieht es, dass wir auch die fernen Aussenpunkte in verschiedener Entfernung sehen, wie es ihrer wirklichen Vertheilung im Raume einigermassen entspricht. Dieselben Motive helfen auch beim binocularen Nahesehen sehr wesentlich mit zur richtigen Localisirung und bestimmen dieselbe beim einäugigen Sehen fast ausschliesslich.

Die Linearperspective. Die scheinbaren Veränderungen der Gestalt und gegenseitigen Lage der Objecte, welche aus der Art ihrer Projection auf die Netzhautfläche resultiren, sind uns nach vielfacher Erfahrung bekannt, und so wird es möglich, dass sehr verschieden gestaltete Netzhautbilder eines und desselben Objectes das mehr oder weniger deutlich in unserer Erinnerung liegende Bild seiner wirklichen Gestalt zur Reproduction bringen. Dabei gilt im Allgemeinen die Regel, dass die einzelnen Punkte des Sehdinges auf den durch das Netzhautbild ihnen angewiesenen Sehrichtungslinien bleiben und nur die Entfernung, in welcher sie auf diesen Linien des Sehraumes erscheinen, durch die Reproduction des Erinnerungsbildes bestimmt wird. Parallele horizontale Linien, welche, wie z. B. die Eisenbahnschienen, weit vor uns hinauslaufen, und deren Netzhautbilder sehr stark convergiren, scheinen uns, wenn wir ihren fernsten Punkt fixiren, zwar auch zu convergiren, aber doch nur sehr allmählich; entsprechend dieser Convergenz sehen wir ihr fernes Ende etwas höher als das nähere. Analog verhält es sich mit allen anderen perspectivischen Verkürzungen.

Wir orientiren uns hauptsächlich auf Grund der horizontalen und verticalen Linien des Aussenraumes und der rechten Winkel, welche

von beiden eingeschlossen werden. Diese Winkel bilden sich aber auf den Netzhäuten meist als stumpfe oder spitze ab, wobei der verticale Schenkel, wenn er fixirt wird, immer annähernd auf denselben Meridian der Netzhaut zu liegen kommt. Solche schiefwinklige Netzhautbilder reproduciren uns besonders leicht das Erinnerungsbild eines rechten Winkels. Dies hat zur Folge, dass der nicht verticale Schenkel des Winkels innerhalb der ihm zukommenden Sehrichtungsebene eine seiner wirklichen Lage wenigstens annähernd entsprechende scheinbare Lage annimmt. Die Neigung zum derartigen Sehen eines schiefen Winkels ist so stark, dass sie auch da sich geltend macht, wo sie der Wirklichkeit nicht entspricht. Betrachten wir einäugig oder mit fester binocularer Fixation den Mittelpunkt des Kreuzes *a* in Fig. 61, so scheint uns meist der schiefe Schenkel aus der Ebene des Papieres im einen oder andern Sinne verschoben; etwas minder stark ist diese Verschiebung beim Kreuze *b*, am schwächsten bei *c*, weil hier kein Schenkel des Kreuzes vertical oder horizontal ist.

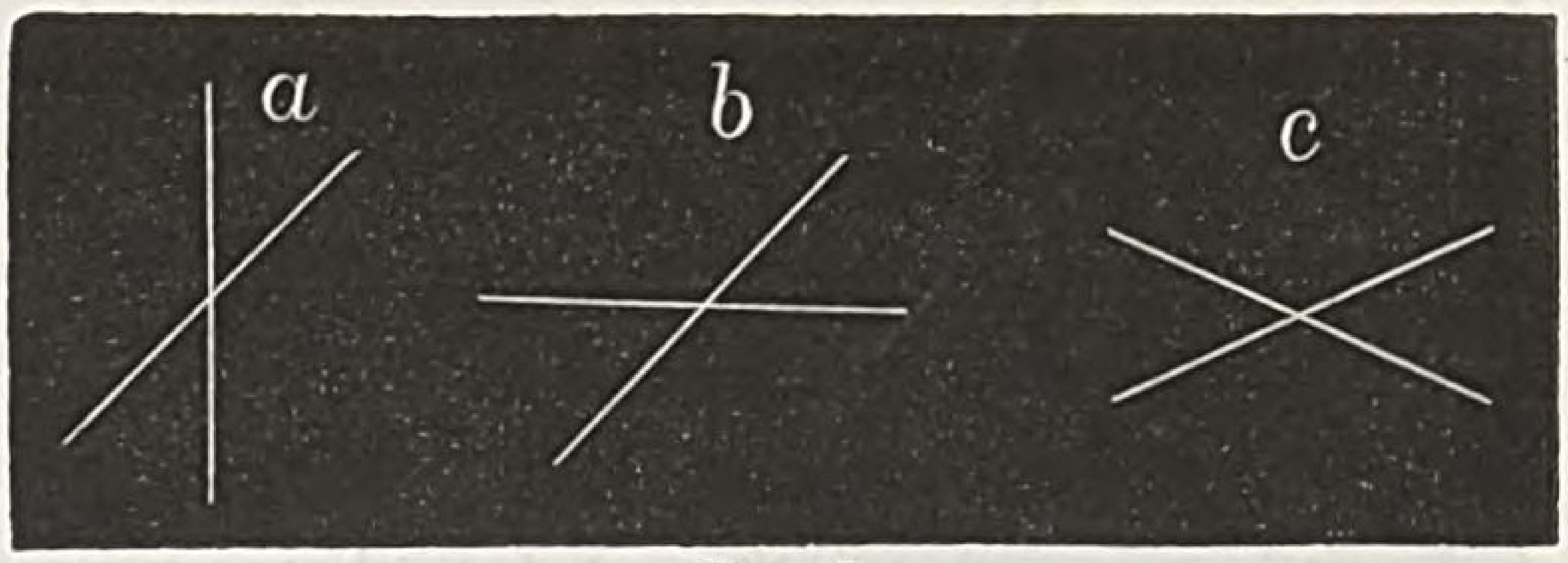


Fig. 61.

Fertigt man solche Kreuze aus feinem Draht und hält sie parallel zur Frontalebene gegen einen gleichfarbigen Hintergrund, so ist die Täuschung eine noch stärkere, weil ihr nicht das Anschauungsbild eines ebenen Papieres entgegenwirkt.

v. Recklinghausen[1], der zuerst den Einfluss der Linearperspective auf die Tiefenwahrnehmung etwas eingehender erörterte, führt folgendes Beispiel an: „Bewegt man eine, an einer in der Medianebene des Körpers befindlichen Geraden befestigte zweite Gerade um den Befestigungspunkt in der Ebene beider, so kann man, besonders bei der Betrachtung mit einem Auge, durch diese successive Veränderung der Winkel die bewegte Linie in schräger Richtung durch die Ebene hindurchwandern lassen.“


Fig. 62.

Zeichnet man die Figur 62 auf Glas, oder fertigt sie aus Draht an und stellt sie parallel zur Frontalebene, so treten leicht beide Leitern aus ihrer wirklichen Ebene scheinbar heraus; die eine scheint mit dem obern Ende nach vorwärts oder

1 v. Recklinghausen, Arch. f. Ophthalmologie V. (2) S. 164. 1859.

rückwärts, die andere meist entgegengesetzt geneigt.[1] Zeichnet man die Leitern mit sehr dicken Strichen vergrössert auf eine ebene Fläche und erzeugt sich von ihnen ein gutes und vollständiges Nachbild, so sieht man dasselbe.

Die Figur ist ein Theil des früher erwähnten Zöllner'schen Musters, und Volkmann[2] war deshalb der Ansicht, dass die Täuschung bei diesem Muster ihren Grund darin hat, dass wir die Zeichnung der Leitern perspectivisch auslegen, so dass sie nicht mehr parallel erscheinen. Will man das früher erörterte Falschsehen schiefer Winkel und die daraus resultirenden Täuschungen aus diesem Gesichtspunkte erklären, so muss man sagen, dass die durch perspectivische Auslegung entstandene Gewohnheit des Grössersehens der spitzen und des Kleinersehens der stumpfen Winkel so grosse Macht habe, dass sie selbst dann zur Geltung komme, wenn die schiefen Winkel in der Ebene gesehen werden, in welcher sie sich wirklich befinden.

Einfache perspectivische Linearzeichnungen gestatten oft eine doppelte Auslegung, wie dies schon die eben erwähnten Beispiele lehrten und wie es auch Figur 63 zeigt (Necker[3]), in welcher uns bald die eine, bald die andre Ecke vorn zu liegen scheint. Es hängt theils von der Willkür, theils von der mehr oder minder grossen Wahrscheinlichkeit, oft auch von unberechenbaren Zufälligkeiten ab, welche Art des Sehens eintritt. Aus demselben Grunde ist es oft schwer, die wirkliche Stellung einer entfernten Wetterfahne zu erkennen, die sich schiefwinklig zur Stange auf unserer Netzhaut projicirt hat.

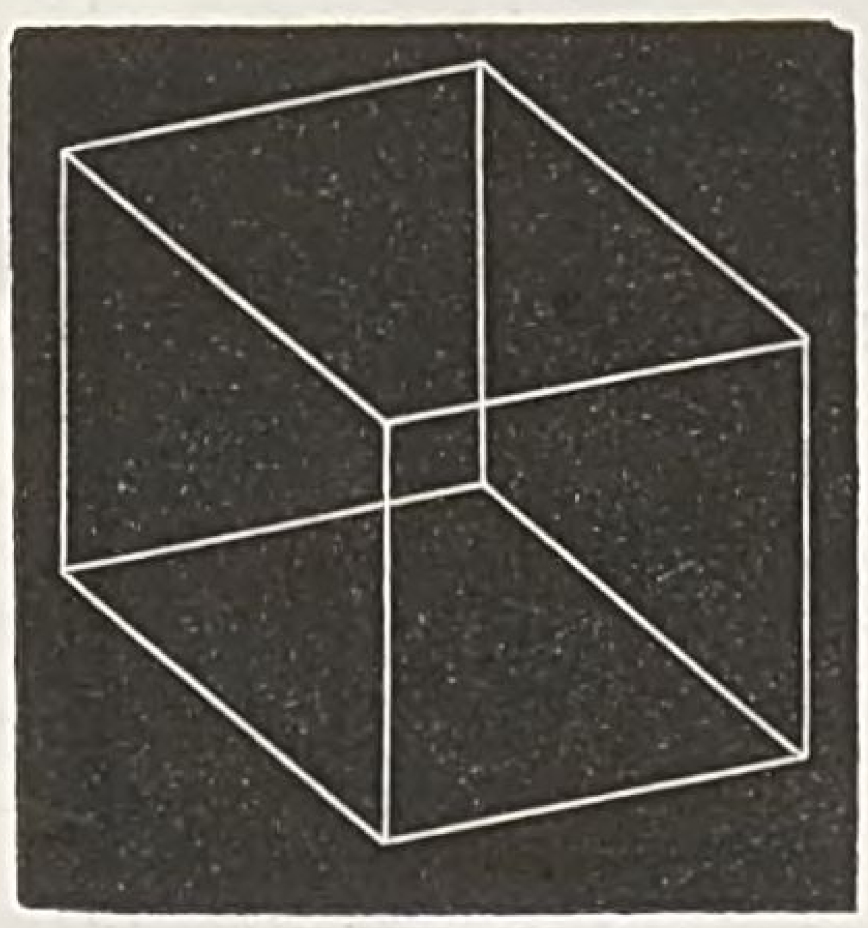


Fig. 63.

Eine ferne Windmühle, deren Flügelebene stark zur Frontalebene unseres Kopfes geneigt ist, sieht man in der Dämmerung bald nach der einen bald nach der andern Richtung sich drehen, je nachdem man die jeweilig näheren Flügel auch als die näheren sieht, oder der Täuschung verfällt, dass sie die ferneren sind (Sinsteden[4]). Man kann diese Täuschung mit einem aus Drähten gebildeten und um seinen Mittelpunkt gedrehten Stern leicht herbeiführen, wenn man denselben einäugig und halb von der Seite betrachtet. Bei Illuminationen sieht man zuweilen rotirende mit kleinen Gasflämmchen besetzte Raumspiralen, welche aus der Ferne be-

1 Hering, Beiträge zur Physiologie I. S. 79. 1861.
2 Volkmann, Physiol. Untersuch. im Gebiete d. Optik I. S. 163. 1863.
3 Necker, Annal. d. Physik u. Chemie XXVII. S. 502.
4 Sinsteden, ebenda CXI. S. 336. 1860.

trachtet sich bald in der einen bald in der andern Richtung zu drehen scheinen.

Bei solchen Täuschungen zeigt sich übrigens die merkwürdige Thatsache, dass wenn man längere Zeit die Bewegung in der einen Richtung gesehen hat, sie sich zwangsweise umkehrt, auch wenn man sich bemüht, die richtige Auslegung festzuhalten, und dass der Wechsel zwischen der einen und andern Richtung der scheinbaren Bewegung mit der Zeit immer häufiger wird.

Die Vertheilung von Licht und Schatten ist ein weiteres wichtiges Hülfsmittel für die richtige Localisirung. Wir sehen, wie oben erörtert wurde, den Schatten nicht als etwas der Fläche Inhärentes, sondern gleichsam gesondert auf der Fläche. Je nachdem er hier und dort sozusagen dünner oder dicker aufgelegt ist, lässt er die Einzeltheile eines Reliefs vor- und zurücktreten. In so weit er sich als Schlagschatten zeigt, giebt er Aufschluss über das Lagenverhältniss des beschatteten zum schattenwerfenden Gegenstande.

Es wurde schon oben eine Täuschung erwähnt, derzufolge wir bisweilen Erhabenes vertieft oder Vertieftes erhaben sehen. Bringt man in einer dem Beobachter nicht auffälligen Weise einen Schirm zwischen eine Matrize und die Lichtquelle und beleuchtet die erstere durch einen Spiegel von der entgegengesetzten Seite, so sieht der Unbefangene die Matrize meist zuerst als Patrize. Oppel[1] nannte eine derartige Vorrichtung Anaglyptoskop. Die Schrift jedes Petschaftes lässt sich auch ohne solche Hülfsmittel erhaben sehen oder „invertiren“, wenn man sich das Erinnerungsbild der erhabenen Schrift zu reproduciren sucht. Gypsformen aber von menschlichen Gliedern, welche wir nicht in der Hohlform zu sehen gewöhnt sind, invertiren sich bei einäugigem Sehen ganz von selbst (Schröder[2]).

Den Einfluss der Luftperspective hat besonders Helmholtz[3] erörtert. Die farbigen Töne, welche vor den entfernten Theilen einer Landschaft liegen, dienen uns, soweit wir sie nicht als Flächenfarbe sehen, als Hülfsmittel zu einer der Wirklichkeit besser entsprechenden Localisirung der entfernten Dinge. Die fernen Berge erscheinen bläulich, wir localisiren aber das Blau nicht in die Oberfläche der Berge, sondern sehen es vor denselben im Raume und durch dasselbe hindurch die grünlichen Berge. Wird das Blau zu stark, so legt es sich zugleich deutlich als Farbe auf die Berge selbst.

1 Oppel, Annal. d. Physik u. Chemie XCIX. S. 466. 1855.
2 Schröder, ebenda CV. S. 298. 1858.
3 Helmholtz, Physiol. Optik S. 629 u. 724.

Helmholtz hat die Lebhaftigkeit betont, mit welcher wir die sogenannten Lufttöne der Landschaft sehen, wenn ihr Bild anders als gewöhnlich auf der Netzhaut liegt. Die farbige Empfindung drängt sich dann, weil uns, wie oben erörtert wurde, die ganze Landschaft mehr flach wie ein Bild erscheint, als Farbe in die Oberfläche der Dinge zusammen und wird nicht mehr vor dieselbe als blosses farbiges Licht localisirt.

Der Nebel wirkt ähnlich wie die Luftperspective. Man sieht den Nebel raumhaft und durch ihn hindurch die Dinge in grösserer Ferne und deshalb grösser. Die Grösse eines uns im Nebel begegnenden Menschen wird anfangs oft bedeutend überschätzt.

Die Trübung der Luft also, sei es, dass sie sich nur durch die sogenannten Lufttöne oder durch wirklichen Nebel verräth, lässt uns die Dinge ferner und grösser erscheinen, und zwar wohl hauptsächlich deshalb, weil wir weniger Einzelheiten an ihnen erkennen als bei klarer Luft. Denn erstens wird eine mit vielen sichtbaren Einzelheiten bedeckte Fläche überhaupt grösser gesehen, wie schon S. 554 gezeigt wurde, zweitens aber wissen wir aus Erfahrung, dass ein und dasselbe Ding um so weniger von seinem Detail erkennen lässt, je weiter es entfernt ist. Die Bewohner der Ebene sehen im Gebirge die fernen Dinge meist zu nahe, weil die Klarheit der Luft die Dinge mehr in ihrer wesentlichen Farbe zeigt und mehr Einzelheiten an denselben wahrnehmen lässt, als die dunstige Luft der Ebene.[1]

Dinge, deren S e h g r ö s s e durch die Erfahrung gegeben ist, localisiren wir auf Grund derselben um so entfernter, je kleiner das von ihnen entworfene Netzhautbild ist. Ist uns umgekehrt die Sehferne eines seiner Grösse nach unbekannten Dinges aus anderweiten Motiven gegeben, so sehen wir es um so grösser, je grösser diese Sehferne ist.

Zahlreiche Anhaltspunkte für die Unterscheidung des Näheren vom Ferneren liefert die p a r t i e l l e D e c k u n g der fernen Dinge durch die näheren, ebenso die B e w e g u n g d e r O b j e c t e u n d insbesondere die B e w e g u n g u n s e r e s K o p f e s oder Körpers, bei welcher sich die Netzhautbilder und die Sehdinge in einer ganz gesetzmässigen, vom gegenseitigen Tiefenabstande der Objecte abhängigen Weise gegen einander verschieben. Fixiren wir ein nahes Object und bewegen den Kopf seitwärts, so zeigen die fernen Dinge eine Bewegung in demselben Sinne, fixiren wir ein fernes, so bewegen

1 Ueber die verschiedene Sehgrösse des Mondes und der Sonne, je nachdem sie am hohen Himmel oder über dem Horizonte stehen, und über die scheinbare Form des Himmelsgewölbes vergl. insbesondere Helmholtz, Physiol. Optik S. 630.

sich die näheren in entgegengesetztem Sinne als wie der Kopf. Diese Bewegungen der Sehdinge sehen wir als solche, beziehen sie aber gleichwohl nicht auf Bewegungen der Aussendinge. Sie geben uns ein gutes Mittel zur Localisirung nach der Tiefe, weil sie bei gleichschneller Bewegung des Kopfes um so grösser sind, je weiter das entsprechende Ding vor oder hinter dem eben fixirten Punkte liegt. Bei raschem Fahren auf der Eisenbahn sind diese Bewegungen der Sehdinge am auffälligsten. Betrachtet man dabei immer nur das in mässiger Entfernung von der Bahn Gelegene, so scheinen die ferneren Dinge mit uns vorwärts, die näheren aber in der entgegengesetzten Richtung fortzueilen, und es entsteht dadurch der Anschein einer Drehung der ganzen Landschaft um den jeweilig betrachteten Punkt.

Auch über die absolute Entfernung der Dinge könnte uns die Kopfbewegung einigen Aufschluss geben. Die Bilder sehr ferner Dinge ändern ihre Lage auf der Netzhaut fast gar nicht, wenn man den Kopf verschiebt; je näher die Dinge sind, desto grösser und schneller ist die Verschiebung der Bilder, welche, in dem Maasse als sie entsteht, durch Augenbewegungen compensirt wird, wenn der Blick auf dem bezüglichen Dinge festgehalten wird. Die Art der Bildverschiebung und der compensirenden Augenbewegung ist also eine Function der Entfernung des fixirten Objectes und könnte daher ein Mittel zur entsprechenden Localisirung sein. Inwieweit dies der Fall, wurde bisher nicht untersucht.

Helmholtz[1] hat auf die durch Kopfbewegung hervorgerufenen Scheinbewegungen aufmerksam gemacht, welche sich bei haploskopischen Versuchen zeigen. Legt man z. B. zwei gleiche Münzen nebeneinander auf den Tisch und betrachtet sie haploskopisch mit parallelen Gesichtslinien, so bewegt sich ihr Bild bei Bewegung des Kopfes in entgegengesetztem Sinne; haploskopirt man aber mit gekreuzten Gesichtslinien, so bewegt es sich in gleichem Sinne wie der Kopf. Dem entspricht, dass Manche das haploskopische Bild bei gekreuzten Gesichtslinien ferner, bei parallelen näher sehen, als die in gewöhnlicher Weise betrachteten Münzen. Nach der Lage des Blickpunktes wäre das Gegentheil zu erwarten (vergl. S. 431).

Nicht bloss auf die Localisirung des Kernpunktes und der Kernfläche und auf die Anordnung der Sehdinge nach der Dimension der Tiefe wirken die Erfahrungsmotive ein, sondern auch die Lage der Längsmittelebene kann wesentlich mit durch sie bestimmt werden. Neigen wir den Kopf stark seitwärts, so sehen wir, wenn wir die

1 Helmholtz, Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1878. S. 323.

Erfahrungsmotive möglichst ausschliessen, eine wirklich verticale Linie nicht vertical, sondern entgegengesetzt der Kopfneigung geneigt. (Aubert [1].) Wir unterschätzen gleichsam bei dieser ungewöhnlichen Kopfhaltung, wie Aubert gezeigt hat, die Neigung des Kopfes, und die schwache entgegengesetzte Rollung der Augen (vergl. S. 507) kann diese Ueberschätzung bei starken Kopfneigungen nicht compensiren. Blickt man durch eine Röhre nach einer gleichmässig gefärbten Fläche, lässt einen Draht zwischen beiden bewegen und so lange drehen, bis er vertical scheint, so ergibt sich, dass er in Wirklichkeit stark seitwärts geneigt ist. Unter gewöhnlichen Umständen aber localisiren wir gleichwohl auch bei jeder Neigung des Kopfes die Verticalen richtig, weil fast immer einige vorhanden sind, deren Lage wir bereits aus Erfahrung kennen.

VIERZEHNTES CAPITEL.

Ueber Stereoskopie.

Wenn man genau dieselben Netzhautbilder, welche ein nach der Tiefe ausgedehntes Object oder ein mit verschieden entfernten Dingen erfüllter Gesichtsraum gibt, durch zwei (nach der S. 393 gegebenen Regel entworfene) Bilder erzeugen könnte, deren je eines vor ein Auge gestellt ist, so würden in beiden Fällen die Gesichtsempfindungen und ihre Anordnung im Sehraume dieselben sein müssen. Dies wird angestrebt, aber freilich nie vollkommen erreicht mittels des von Wheatstone erfundenen Stereoskopes. Dasselbe ist nur eine besondere Art jener Vorrichtungen, welche wir (Cap. I und VI) als haploskopische bezeichnet haben. Während die dort besprochenen Versuche nur die binoculare Verschmelzung correspondirender oder disparater Bilder bei ruhendem Blicke betrafen, gilt es beim Stereoskope dem bewegten Doppelauge durch die beiden Bilder genau dieselben Empfindungen zu erwecken, wie sie durch die entsprechenden wirklichen Objecte erzeugt werden müssten.

Angenommen die beiden Bilder sind nach der auf S. 393 angegebenen Regel angefertigt, was sich, abgesehen von der Farbe,

1 Aubert, Physiol. d. Netzhaut S. 275.

auf photographischem Wege mit ziemlicher Vollkommenheit erreichen liesse, so wäre die nächste Aufgabe, dieselben so vor den Augen aufzustellen, dass die Gesichtslinien bei Fixirung jedes beliebigen Doppelpunktes der Doppelzeichnung genau dieselbe Convergenz hätten, wie bei Fixirung des entsprechenden Punktes des wirklichen Objectes. Dies ist mit hinreichender Genauigkeit möglich. Dagegen lässt sich die zweite Forderung nicht erfüllen, dass die Entfernung der einzelnen Doppelpunkte der Doppelzeichnung dem durch die jeweilige Convergenz bedingten Accommodationszustande der Augen eben so entsprechen solle, wie in der Wirklichkeit. Sollen die beiden Bilder nahe Objecte reproduciren, die sich irgend erheblich nach der Tiefe erstrecken, so erfordert die stereoskopische Betrachtung starke Aenderungen der Convergenz und bringt also auch starke Aenderungen der Accommodation mit sich, die zu der immer gleichen Entfernung der Bildpunkte nicht passt. Stellen aber die Zeichnungen ein fernes Object dar, so können sie eben so wenig wie das entsprechende wirkliche Object irgend erheblich disparate Bilder geben, und es ist also auch wenig oder keine Gelegenheit zu der auf Disparation der Bilder und Aenderung der Convergenz beruhenden Tiefenwahrnehmung gegeben; es handelt sich dann im Wesentlichen nur um Haploskopie congruenter, nicht um Haploskopie disparater Bilder, und nur die letztere wird unter der eigentlichen Stereoskopie verstanden. Während also die auf Haploskopie bei ruhendem Blicke berechnete Doppelzeichnung ihrem Zwecke, wie wir gesehen, ziemlich vollkommen entsprechen kann, ist dies bei den auf eigentliche Stereoskopie mit bewegtem Blicke berechneten Bildern nicht so vollkommen möglich.

Die gewöhnlichen Stereoskopenbilder würden übrigens streng genommen nur für Augen passen, deren gegenseitiger Abstand unverhältnissmässig grösser wäre, als die wirkliche Augendistanz. Sie müssten mit ganz unnatürlich stark convergirenden Gesichtslinien betrachtet werden, wenn sie ein dem wirklichen Objecte geometrisch ähnliches Anschauungsbild erzeugen sollten, welches dann aber viel zu klein, weil viel zu nah sein würde. Werden aber die Bilder bei schwächerer Convergenz betrachtet, und liegt das von ihnen erzeugte Anschauungsbild fern, so muss es insbesondere nach der Dimension der Tiefe verzerrt erscheinen.

Das von Wheatstone construirte Stereoskop, bekannt unter dem Namen des Spiegelstereoskopes, glich im Wesentlichen dem auf S. 393 beschriebenen Spiegelhaploskop; nur waren die Spiegel und die Falze, in welche die Bilder eingeschoben wurden, fest mit

einander in einem Kasten verbunden. Eine Modification dieses fixen Stereoskops ist das auf S. 393 erwähnte bewegliche Stereoskop WHEATSTONE'S.

Allgemein gebräuchlich ist jetzt das BREWSTER'sche Stereoskop, welches in Fig. 64 schematisch dargestellt ist. Die beiden Zeichnungen müssen hier freilich so klein sein, dass, wenn sie neben einander liegen, der Abstand zweier zu einander gehörigen Punkte nicht wesentlich grösser ist, als die Augendistanz. Vor jedem Auge befindet sich ein Prisma, welches seine brechende Kante der Medianebene zuwendet. Jedes Prisma hat convexe Flächen und dient also zugleich als Sammellinse. Als Prisma soll es bewirken, dass trotz der beim Blicken in den Kasten unwillkürlich eingehaltenen Convergenz der Gesichtslinien sich beide Bilder annähernd correspondirend abbilden können, wie wenn die Gesichtslinien parallel ständen; als Linse hat es die Aufgabe, eine Correction der für die grosse Nähe der Bilder nicht genügenden Accommodation herbeizuführen. Verbesserungen dieser Einrichtung wurden dadurch erzielt, dass die Prismen in der Richtung nach dem Auge verschiebbar und zugleich drehbar gemacht wurden, wodurch die Correction der Blicklage und der Accommodation individuellen Verschiedenheiten angepasst werden kann, ferner dadurch, dass durch seitliche Verschiebung eines oder beider Prismen das Instrument sich für verschiedene Augendistanzen einrichten lässt. Zu wissenschaftlichen Untersuchungen ist dieses Stereoskop nicht leicht brauchbar; man wird dann stets besser die beiden Zeichnungen mit freien Augen haploskopisch betrachten, höchstens vor jedes Auge eine Linse zur Correction der Accommodation setzen. HELMHOLTZ bringt vor die parallel gestellten Augen ein Linsensystem, in dessen Brennpunkt die Zeichnung liegt, so dass die Lichtstrahlen so ins Auge gehen, als kämen sie von sehr fernen Punkten.

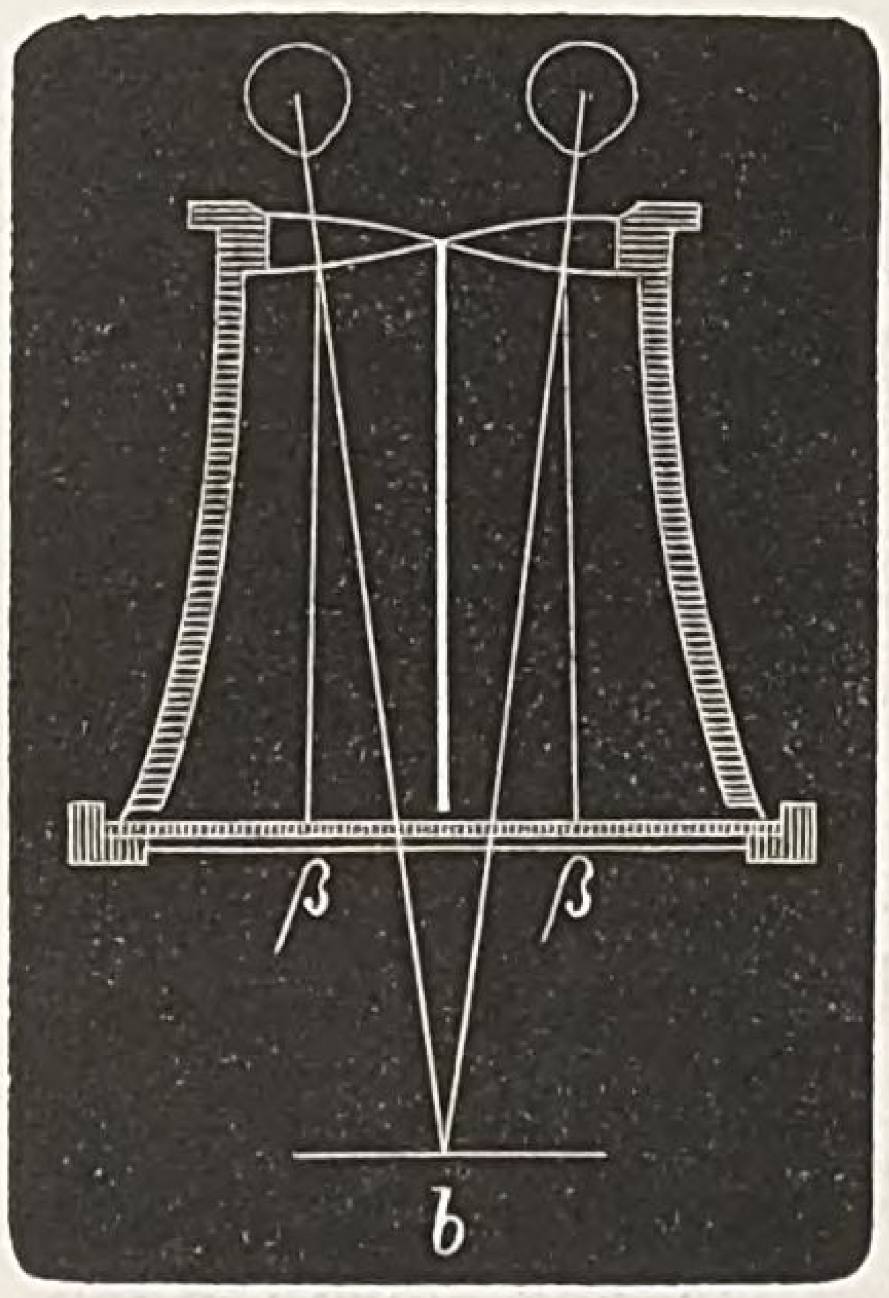


Fig. 64 (nach HELMHOLTZ).

Um von fernen Objecten, welche, direct betrachtet, beiden Augen nahezu oder völlig congruente Bilder geben und deshalb keine auf Disparation der Bilder beruhende Wahrnehmung ihres Reliefs und ihrer Anordnung nach der Tiefe erzeugen, gleichwohl disparate Bilder zu bekommen und so einen energischen körperlichen Eindruck zu erzielen, bedienen sich die Verfertiger der Stereoskopenbilder, wie

erwähnt, des Kunstgriffes, dass sie beide Bilder von zwei Standpunkten aufnehmen, welche viel weiter von einander abliegen, als die beiden Augen. Auf der Benutzung desselben Kunstgriffes beruht das von HELMHOLTZ erfundene Telestereoskop.

Dasselbe ist in Fig. 65 schematisch dargestellt. Befinden sich den Augen l und r gegenüber zwei unter 45^0 gegen einander geneigte kleine Vertikalspiegel und rechts und links davon je ein grösserer Spiegel, der dem kleinen Spiegel derselben Seite parallel ist und demselben die spiegelnde Fläche zuwendet, so sind die Netzhautbilder der mittels doppelter Spiegelung gesehenen fernen Dinge so beschaffen, als ob die beiden Augen so weit auseinanderständen wie die Augen λ und ϱ in der Figur. Bei so grossem Abstande aber würden sie von den nicht allzu fernen Dingen incongruente Bilder erhalten, deren Disparation die Tiefenverhältnisse der Dinge wahrzunehmen gestattet. Je grösser der gegenseitige Abstand der beiden grossen Spiegel, an desto ferneren Dingen wird man deshalb Relief und Tiefanordnung wahrnehmen.

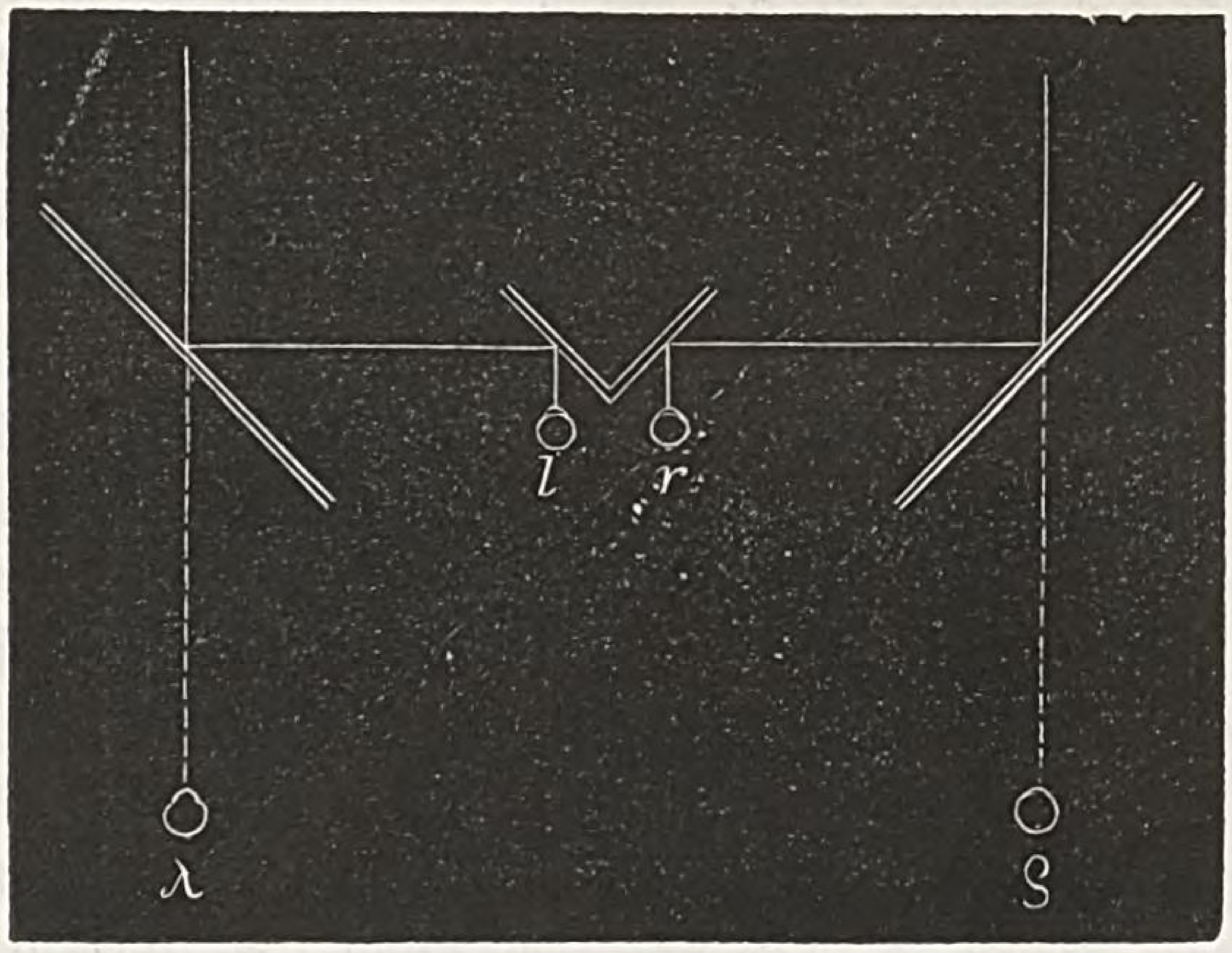


Fig. 65.

Legt man zwei identische kleine Photographien einer Person oder einer Landschaft derart neben einander, dass sie sich bei ungefähr parallelen Gesichtslinien haploskopisch verschmelzen lassen, so macht das Verschmelzungsbild den Eindruck grösserer Naturwahrheit, weil die Stellung der Gesichtslinien derjenigen besser entspricht, welche sie bei Betrachtung des wirklichen Objectes annehmen würden. Von einer einfachen Photographie kann man denselben natürlichen Eindruck erhalten, wenn man durch einen von HIRSCHBERG [1] angegebenen Apparat dafür sorgt, dass man die Photographie trotz ihrer Nähe mit parallelen Gesichtslinien betrachten kann. Der Apparat besteht aus zwei Glasprismen mit parallelogrammatischem Querschnitt in der Anordnung, wie sie die Fig. 66 zeigt. Befindet sich in a das

1 HIRSCHBERG, Arch. f. Anat. u. Physiol. 1876. S. 622.

Object, in l das linke und in r das rechte Auge, so trifft bei Parallelstellung jede Gesichtslinie auf das ihr gerade gegenüber in a gelegene, durch zweimalige Spiegelung entstandene und beiderseits ganz gleiche Bild des Objectes a.[1]

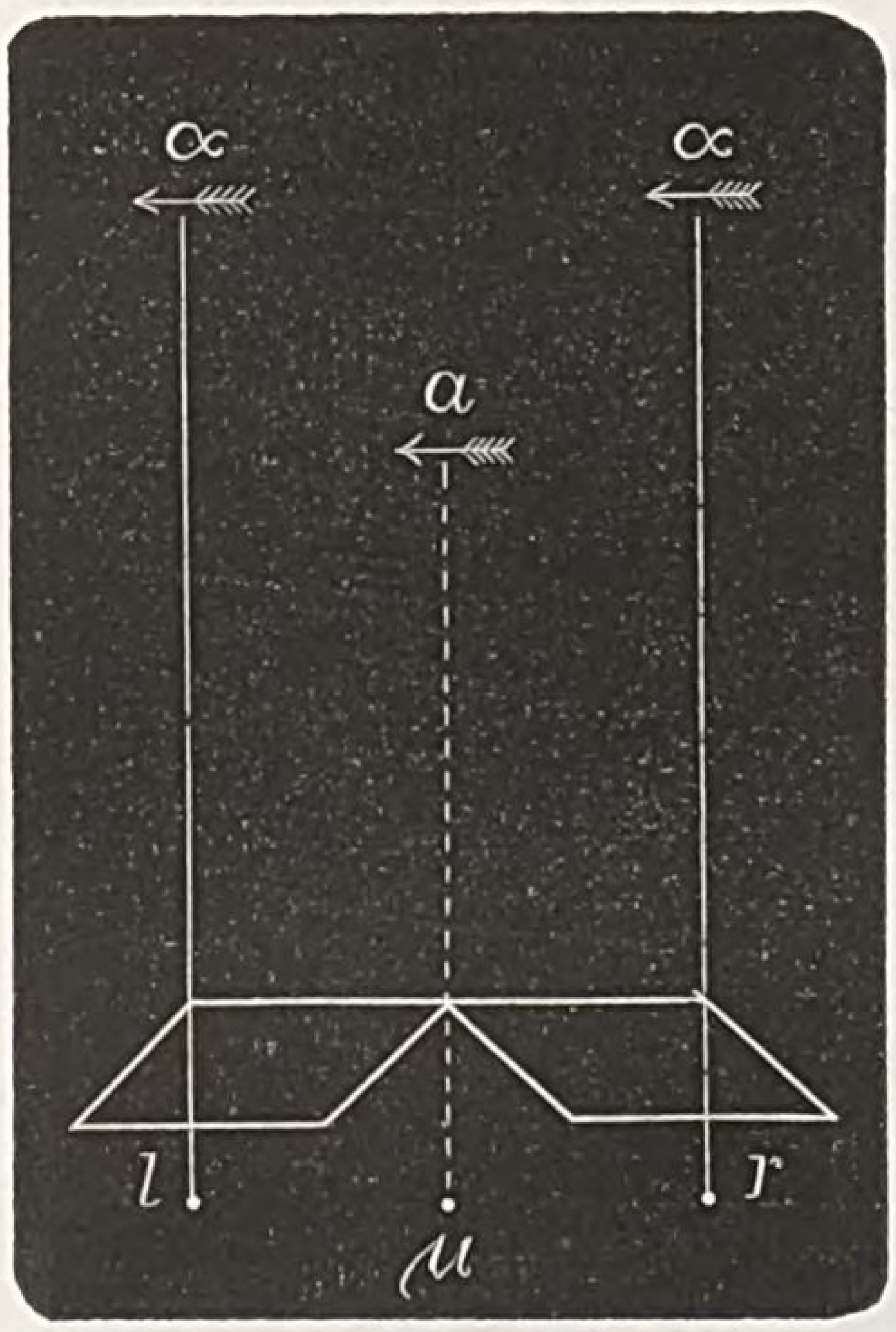


Fig. 66.

Dieser Apparat ist also gleichsam ein umgekehrtes Telestereoskop. Wie man sieht, haben in Fig. 66 die spiegelnden Flächen jeder Seite in der zur Frontalebene parallelen Richtung einen Abstand, welcher der halben Augendistanz gleich ist. Macht man diesen Abstand beiderseits kleiner, so kann man mit dem Apparate das Relief naher Dinge, welche, wie z. B. das Trommelfell, nicht beiden Augen zugleich zugängig sind, gleichwohl binocular, jedoch verflacht, wahrnehmen. Man denke sich das Relief in a, die Augen l und r aber weiter von einander abstehend, als auf der Zeichnung, so würde das Auge l das linke Spiegelbild a etwas von der linken, das rechte Auge das rechte Bild a etwas von der rechten Seite sehen, und beide Augen würden deshalb etwas disparate Netzhautbilder erhalten. Aber auch bei unverändertem Abstande der spiegelnden Flächen liesse sich durch Drehung z. B. einer oder beider äussern Spiegelflächen eine leichte Verschiebung und Wendung des bezüglichen Spiegelbildes erzielen, so dass das linke Auge dasselbe von einer etwas andern Seite sehen würde als das rechte. Auf derartigen Einrichtungen beruhen die binocularen Augenspiegel (GIRAUD-TEULON, BÖTTCHER[2]) und Ohrenspiegel (BÖTTCHER[2]).

Vertauscht man im Stereoskop die beiden Bilder oder bringt man dieselben ohne Apparat mit gekreuzten Gesichtslinien zur Deckung, so erhält beidenfalls jedes Auge das fürs andere Auge bestimmte Netzhautbild, so dass jede gekreuzte Disparation in eine ungekreuzte, jede ungekreuzte in eine gekreuzte verwandelt und dadurch die scheinbare Anordnung des Gesehenen nach der Tiefe umgekehrt wird. Ein Relief erscheint dann wie die Matrize desselben, ein Kegel als Hohlkegel, ein durchsichtiges Polyeder derart, dass die hintere Fläche

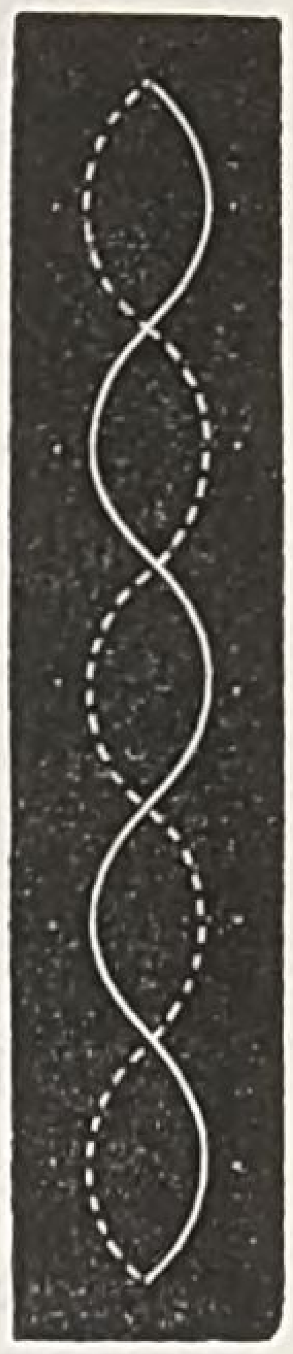
1 Die Zeichnung ist so entworfen, als befände sich zwischen den beiden spiegelnden Flächen nicht Glas, sondern Luft.

2 BÖTTCHER, Arch. f. Ophthalmologie XX. (2) S. 182. 1874.

desselben nach vorn gekehrt ist u. s. w. Stellen die Zeichnungen Objecte dar, die keine solche Invertirung gestatten, weil die Vertheilung von Licht und Schatten, die theilweise Deckung des hinter einander Gelegenen und andere Momente die der Wirklichkeit entsprechende Localisirung fordern, so entsteht ein eigenthümlicher Kampf zwischen den beiden Arten der Localisirung, wobei einzelne Stücke des Bildes nach den Gesetzen der einen, andere nach den Gesetzen der anderen Art gesehen werden (Panum [1]).

Auch wirkliche Objecte kann man in einer nach der Richtung der Tiefe umgekehrten Form und Anordnung sehen, wenn man vor jedes Auge ein rechtwinkliges Prisma (Reversionsprisma) so stellt, dass seine Kanten senkrecht und die Hypotenusenfläche der Medianebene parallel liegt. Dann sieht jedes Auge ein Spiegelbild der Dinge, so dass ebenfalls Rechts und Links vertauscht ist. Wheatstone nennt einen derartigen Apparat das Pseudoskop.

Man kann sich ferner auch von beliebigen planen Objecten stereoskopische Anschauungen verschaffen, wenn man durch irgend welches optische Hülfsmittel die Correspondenz seiner beiden Netzhautbilder in entsprechender Weise stört. Hält man bei binocularem Sehen vor ein Auge ein Prisma, so erscheinen gerade Linien auf einem Papiere, besonders die der Kante des Prisma parallelen, nach der Tiefe gekrümmt (Ruete). Das mit dem Prisma bewaffnete Auge sieht diese Linien in der Ebene des Papiers gekrümmt und durch Combination dieses krummen Bildes mit dem geraden des anderen Auges entsteht der stereoskopische Effect.


Fig. 67. Listing.

Verschiebt man eines der Netzhautbilder eines planen Objectes nach oben oder unten, was durch leichten Fingerdruck auf den Augapfel oder besser mittels eines Prismas geschieht, dessen brechende Kante horizontal liegt, so erhält man ebenfalls, wie Listing [2] gezeigt hat, bisweilen überraschende stereoskopische Eindrücke, falls nämlich die längs-disparaten Netzhautbilder eben so gut die quer-disparaten Bilder eines nach der Dimension der Tiefe ausgedehnten Objectes sein könnten. Freilich gehört dazu, dass die durch solche Disjunction, wie es Listing nennt, bewirkte Disparation der Bilder nicht wieder durch einseitige Hebung oder Senkung des einen Auges ausgeglichen werde. Beistehende Figur 67 ist besonders geeignet, die Stereoskopie durch blosse Bilderverschiebung zu erläutern. Betrachtet man sie, während man vor das eine

1 Panum, Physiol. Unters. über d. Sehen mit zwei Augen. Kiel 1858.
2 Listing, Göttinger Nachrichten 1869. Nr. 21. S. 431.

Auge ein Prisma mit horizontaler Kante hält, oder aber durch eine Brille, deren eines Glas man etwas nach oben, das andere nach unten verschoben hat, so dass die in Bezug auf das Auge nicht mehr centrirten Gläser beiderseits im entgegengesetzten Sinne als Prismen wirken, so erscheinen die beiden geschlängelten Linien als Raumspiralen.

Fertigt man sich dieselbe Figur doppelt an, betrachtet die Doppelfigur haploskopisch und verschiebt dann die eine Figur nach oben oder unten, so ergiebt sich derselbe Effect.

Zeichnet man auf die Papierfläche ein nahezu rechtwinkliges Kreuz, dessen einer Schenkel quer, der andere der Medianebene nicht ganz parallel liegt und hält vor das eine Auge ein Reversionsprisma, so scheint, wenn die quere Linie einfach gesehen wird, die andere zur Papierfläche geneigt und parallel der Medianebene. Denn dieselbe erscheint dem unbewaffneten Auge in entgegengesetztem Sinne geneigt als dem anderen Auge, welches das Spiegelbild empfängt. Jede ein wenig unsymmetrische Projection einer einfachen symmetrischen Figur giebt auf diese Weise einen stereoskopischen Eindruck (Helmholtz).

Schaltet man hinter das Objectivsystem eines Mikroskopes einen Prismenapparat ein, welcher analog wirkt, wie der in Fig. 66 dargestellte, so wird jeder aus dem untergelegten Präparate austretende Strahlkegel in zwei Hälften gespalten, welche verschiedene Wege einschlagen und jeder für sich durch je ein Ocular einem der beiden Augen zugeleitet werden können. Da den verschiedenen Strahlkegeln Objectpunkte entsprechen, welche in verschiedener Tiefe des Präparates liegen, so kann sich das Auge nicht gleichzeitig für alle Strahlkegel accommodiren, sondern nur für eine Gesammtheit solcher, deren zugehörige Objectpunkte annähernd in einer und derselben Ebene liegen. Bilden sich diese Punkte in beiden Augen correspondirend ab, so geben alle ferneren und alle näheren Punkte nicht correspondirend liegende Zerstreuungskreise, weil die Strahlkegel zu dünn sind, um die ganze Pupille auszufüllen, und das eine Auge nur die rechte, das andere nur die linke Hälfte jedes Strahlkegels und also auch des Zerstreuungskreises empfängt. Die Disparation dieser sehr kleinen Zerstreuungskreise bedingt das Näher- und Fernersehen der zugehörigen Punkte im Vergleich mit denen, für welche das Auge eben accommodirt ist.

In solcher Weise kommt, wie Helmholtz gezeigt hat, die stereoskopische Wirkung der binocularen Mikroskope zu Stande. In Nachet's binocularem Mikroskope wird übrigens nur die eine Hälfte

jedes Strahlkegels vom ursprünglichen Wege durch Prismen abgelenkt, während die andere ihren directen Weg fortsetzt.

Ueber noch andere Vorrichtungen und Apparate zur Erzielung stereoskopischer Eindrücke vergl. HELMHOLTZ, Physiol. Optik S. 685.

FÜNFZEHNTES CAPITEL.

Ueber binoculare Farbenmischung und binocularen Contrast.

Es bleibt uns übrig, einige Gesichtsempfindungen zu besprechen deren Entstehung das Zusammenwirken beider Augen ganz besonders zur Voraussetzung hat. Obwohl jede Gesichtsempfindung nicht blos von der einen, sondern immer, wenn auch oft in kaum merklicher Weise, zugleich von der andern Hälfte des Sehorganes mit bestimmt wird, so hat man sich doch gewöhnt, die hier zu erörternden Thatsachen der Empfindung von der Besprechung der übrigen abzusondern. Wir folgen also hier nur einem Gebrauche, nicht einer aus der Natur des Gegenstandes sich ergebenden Forderung.

I. Ueber binoculare Farbenmischung.

Schon bei Erörterung des Wettstreites der Conturen wurden beiläufig die Erscheinungen erwähnt, welche sich zeigen, wenn zwei correspondirende Netzhauttheile in verschiedener Weise bestrahlt werden. Wir fanden, dass dabei bald die von der einen, bald die von der andern Netzhaut ausgelöste Empfindung deutlicher ins Sehfeld trat, bald aber auch die resultirende Empfindung einer Mischfarbe.

Das Entstehen einer resultirenden Empfindung oder die Möglichkeit der binocularen Farbenmischung ist von den Einen ebenso entschieden bestritten, als von den Andern behauptet worden.[1] Der Widerspruch erklärt sich, ganz abgesehen von der Verschieden-

1 Die reiche Literatur dieser Frage findet sich verzeichnet bei FECHNER, Ueber einige Verhältnisse des binocularen Sehens. Ber. d. sächs. Ges. d. Wiss. VII. 1860; AUBERT, Physiol. d. Netzhaut S. 299. 1865; HELMHOLTZ, Physiol. Optik S. 791; W. v. BEZOLD, Annal. d. Physik u. Chemie. Jubelband 1874. S. 585.

heit der individuellen Disposition, einerseits aus der Verschiedenheit der Bedingungen, unter welchen beobachtet wurde, anderseits daraus, dass man unter binocularer Farbenmischung nicht immer dasselbe verstand und an diese Mischung sehr verschiedene Anforderungen stellte.

Legt man, unter sogleich weiter zu erörternden Bedingungen, zwei rothe (*a' a* Fig. 68) und zwei blaue (*b*, *b'*) Quadrate von gleicher Grösse und ungefähr gleicher Helligkeit und sehr geringer Sättigung in gleichen Abständen neben einander, richtet ein Auge auf *a*, das andere auf *b*, so decken sich ihre Bilder im Sehfelde. Daneben erscheinen nach links noch zwei rothe, nach rechts zwei blaue Quadrate; die äussersten, α und β' sind unoculare Halbbilder, die beiden andern $\alpha'\alpha$, $\beta\beta'$ binoculare und durch Deckung zweier gleichfarbiger Bilder entstanden. Hier interessiren uns nur die drei mittlen Bilder,

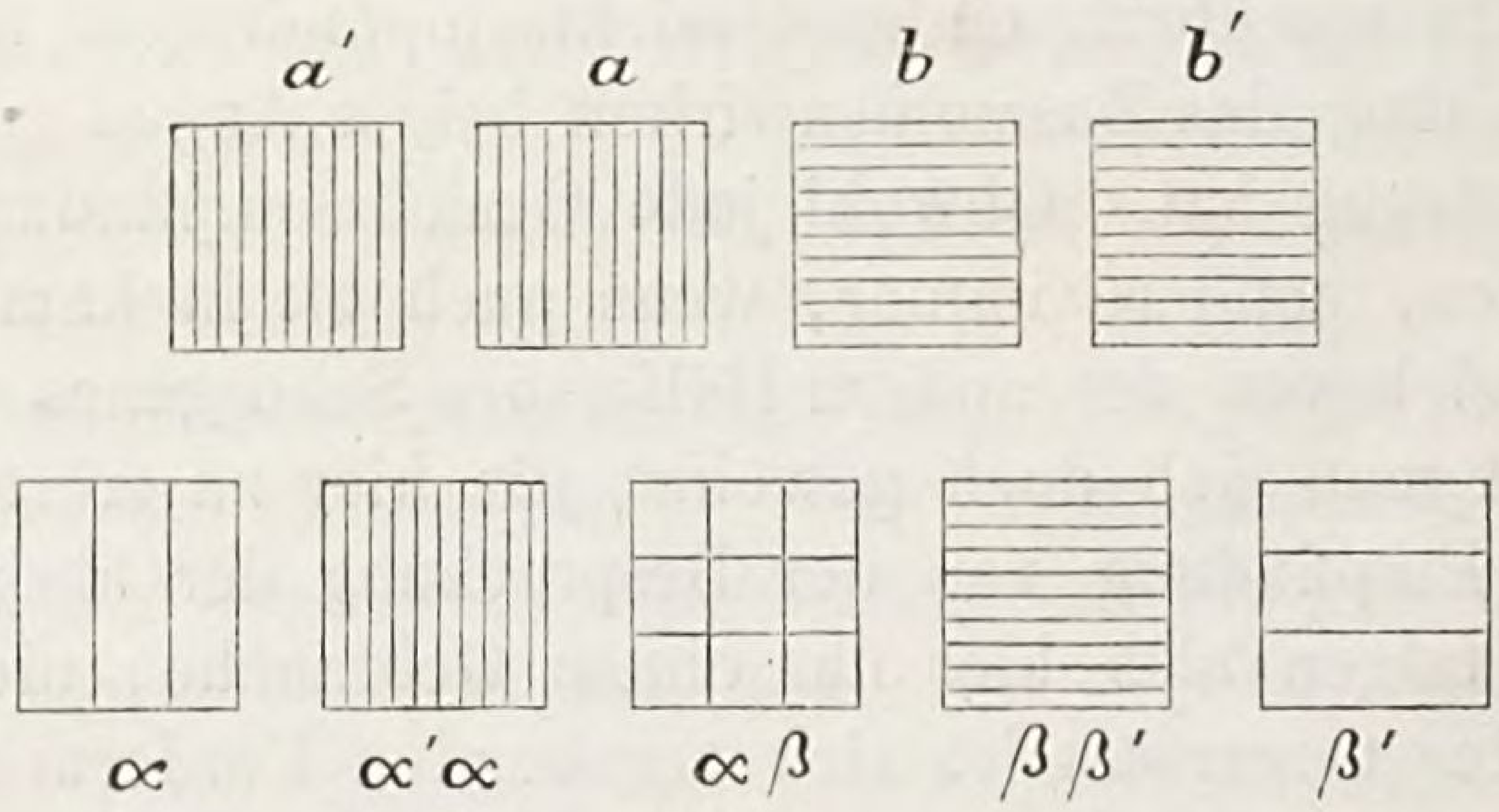


Fig. 68.

welche sämmtlich binocular sind. Vergleicht man die Farbe des mittlen Quadrates mit derjenigen des blauen oder des rothen Nachbarquadrates, so sieht man, dass sie weder der einen, noch der andern ganz gleich ist; meist ist sie auch nicht stetig, sondern wird bald röther, bald blauer, ohne jemals so blau oder so roth zu werden, wie die Farbe der seitlichen Quadrate. Kurz man sieht stets eine Mischfarbe aus Roth und Blau, die bald mehr in das eine, bald mehr in das andere sticht, bald beiden gleich nahe steht und dann ein mittles Rothblau (Violett) ist. Je länger man hinblickt, desto stetiger pflegt die Mischung zu werden und desto bequemer kann man die Mischfarbe mit den beiden Nachbarfarben vergleichen und sich von den Verschiedenheiten überzeugen. Ebenso kann man dann einen längeren Streifen eines wirklich blau-rothen Papiers quer oberhalb oder unterhalb der Quadrate zum Vergleiche hinlegen, auch wohl zufällig eines treffen, welches der Mischfarbe vorübergehend gleich erscheint.

Der Versuch gelingt am besten bei einer sehr mässigen Helligkeit und wenig gesättigten Farben. Die Quadrate müssen durchaus eben sein, weshalb man die farbigen Papiere zweckmässig auf eine Glastafel klebt. Die Farbe muss ganz gleichartig sein und darf keinen Fleck und kein erkennbares Korn haben, auch dürfen die Farben nicht glänzen. Endlich müssen die Netzhautbilder möglichst congruent sein. Da sich letzteres schwer erreichen lässt und jeder nicht genau correspondirend abgebildete Contur den Versuch stört, ist es zweckmässig, dafür zu sorgen, dass die Augen nicht für die Entfernung der Quadrate accommodirt sind, daher der Emmetrope und Hypermetrope besser mit parallelen, der Myope besser mit gekreuzten Gesichtslinien beobachtet. Ueberdies kann man auch passende Linsen benutzen, um die Schärfe der Bilder unmöglich zu machen.

Legt man auf tiefschwarzen, nicht glänzenden Sammet zwei weisse Quadrate, hält vor das eine Auge ein rothes, vor das andere ein blaues Glas, und fixirt mit dem einen Auge das eine, mit dem anderen das andere Quadrat, so sieht man drei Quadrate. Das mittle Quadrat entsteht durch binoculare Deckung eines rothen und eines blauen Bildes, die beiden seitlichen sind unoculare Bilder und tragen die Farbe des Glases. Auch hier sieht man, falls beide Gläser annähernd gleich helle Bilder liefern, das mittle Quadrat in einer wechselnden Mischfarbe, aber nie so roth oder so blau, wie die Nebenquadrate. Es sind hier dieselben Vorsichten zu gebrauchen, wie beim vorigen Versuche und überdies muss dafür gesorgt werden, dass die Gläser ganz rein und gleichartig sind und von solcher Dicke, dass sie annähernd gleichhelle Bilder geben.

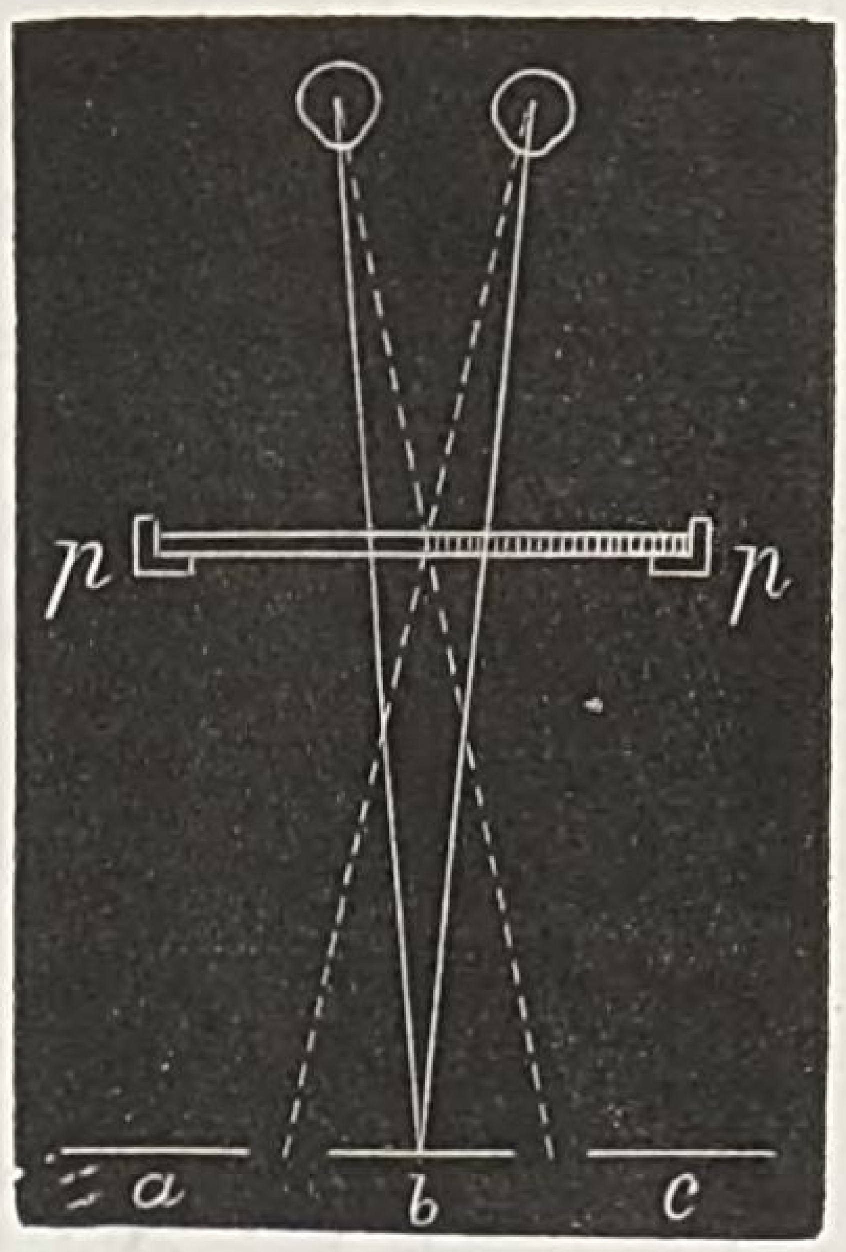


Fig. 69.

Der letzt beschriebene Versuch hat den Mangel, dass die zur Farbenvergleichung benutzten Nebenquadrate nur unoculare Halbbilder sind und daher leicht ihre Helligkeit wechseln, wenn ein Wettstreit mit dem, von correspondirender Stelle des andern Auges gesehenen schwarzen Grunde eintritt. Dieser Uebelstand lässt sich dadurch beseitigen, dass man in einem passenden Rahmen ein rothes und ein blaues Glas neben einander legt, so dass sie sich mit ihren abgeschliffenen Rändern dicht berühren. Diesen Rahmen (*pp* Fig. 69) bringt man zwischen die Augen und den schwarzen Grund, auf welchem drei weisse Quadrate neben einander liegen. Befindet sich dabei die

Grenzlinie des rothen und blauen Glases in der Medianebene und hat der Rahmen die passende Entfernung von den Augen, so wird das mittle Quadrat *b* von dem einen Auge durch das rothe, von dem andern durch das blaue Glas gesehen, das eine seitliche Quadrat wird von beiden Augen durch das blaue, das andere von beiden durch das rothe Glas gesehen. Man erhält so drei binoculare Bilder und kann die Mischfarbe des mittlen mit der Farbe der seitlichen vergleichen. Diese Methode eignet sich besonders für solche, welche ihre Augenstellung noch nicht vollständig in der Gewalt haben.

Bei diesem Versuche ist darauf zu achten, dass die Gläser kein reflectirendes Licht ins Auge schicken, was durch einen oder mehrere passend angebrachte schwarze Schirme und passende Stellung des Kopfes leicht vermieden wird. Für den Anfang thut man gut, schwache Beleuchtung oder dicke Gläser zu wählen. Hat man die nöthige Uebung in der einen oder andern Methode, so kann man zu stärkerer Beleuchtung und satteren Farben übergehn. Man kann dabei jede Farbe mit solchen gleichhellen Farben (einschliesslich des Grau) mischen, welche nicht der Gegenfarbe (Complementärfarbe) nahe stehen. Jedem, der ein normales Augenpaar hat, wird es auf diese Weise gelingen, binoculare, nicht glänzende und nur langsam oder gar nicht mehr wechselnde Mischfarben zu sehen. Der Ton der jeweiligen Mischfarbe gehört dabei immer dem Theile des Farbencirkels an, welcher zwischen den Tönen der beiden gemischten Farben liegt. Je gesättigter die Farben sind, desto leichter tritt Wettstreit und Glanz hervor. Sind die Farben ungleich hell, so ähnelt die Mischfarbe im Allgemeinen mehr der helleren Farbe; aber selbst bei ziemlich grosser Helligkeitsdifferenz behält sie einen mehr oder weniger deutlichen Stich in die dunkle Farbe. Mit wachsendem Unterschiede der beiden Helligkeiten tritt der Wettstreit der beiden Farben und der Glanz immer stärker hervor. Aber erst bei sehr grosser Helligkeitsdifferenz kommt es vor, dass das Mittelquadrat vorübergehend ganz die gleiche Farbe zeigt, wie das hellere Nachbarquadrat. Benutzt man zum Versuche schwarze und weisse Quadrate auf grauem Grunde, so bekommt man den lebhaftesten Wettstreit und die Erscheinung des Glanzes, und wohl nie ein ruhiges Grau. Gegenfarben geben auch bei gleicher Helligkeit viel schwerer eine ruhige Mischfarbe, als andere Farbenpaare. Sind sie jedoch sehr wenig gesättigt, d. h. stark mit Weiss oder Grau versetzt oder sehr dunkel, d. h. stark mit Schwarz versetzt, so bekommt man unter Umständen eine ganz neutrale Resultante. Soll dieselbe weiss sein, so muss man sehr helle,

wenig gesättigte Pigmente, z. B. das vielverbreitete durchgefärbte Briefpapier, wählen und die Quadrate auf schwarzen Grund legen; das resultirende Weiss kann man dann mit einem daneben gelegten Weiss vergleichen. Ebenso kann man ein ruhiges neutrales Grau erhalten, wenn man wenig gesättigte Gegenfarben auf weissem Grunde benutzt.

Das Wichtigste bei allen Versuchen über binoculare Farbenmischung ist die möglichste Beseitigung aller Conturen, Punkte oder irgendwelcher anderen Ungleichartigkeiten der farbigen Fläche. Jeder Contur oder dergl. verhilft, wie wir im Cap. IV gesehen haben, der anliegenden Farbe des Grundes zum Siege im gemeinsamen Sehfeld. Am leichtesten vereiteln deshalb den Erfolg solche Conturen oder Ungleichartigkeiten, welche sich entweder nur auf der einen Netzhaut oder auf beiden nicht correspondirend abbilden. Denn diesenfalls dominirt an der entsprechenden Stelle des haploskopischen Bildes die eine oder andere Farbe, und von diesen Stellen verbreitet sie sich leicht über grössere Theile der Flächen. Eine ruhige gleichartige Mischfarbe ist dann unmöglich. Aus alledem erklärt sich, dass Manche bei ihren Versuchen nicht zum Ziele kamen.

Auf einen besonderen Umstand, der die genaue Correspondenz der Bilder vereiteln kann, hat v. Bezold hingewiesen. Handelt es sich um die binoculare Vereinigung von Farben, die im Spektrum weit auseinander liegen, denen also Strahlen von erheblich verschiedener Brechbarkeit entsprechen, so ist es für Jemand, der Augen von gleichem Refractionsvermögen besitzt, unmöglich, die Ränder zweier haploskopisch zu vereinigenden Flächen beiderseits gleich scharf zu sehn; die Augen accommodiren sich dann entweder für die eine oder für die andere Strahlenart. Das eine Auge empfängt also ein Bild mit scharfen, das andere ein solches mit verwaschenen Conturen, und das erste Bild ist dann im Vortheil.

Ein Contur, welcher sich auf beiden Netzhäuten scharf und correspondirend abbildet, schadet weniger, erhöht aber sozusagen die Spannung zwischen den anliegenden Empfindungen beider Augen, und giebt deshalb leicht Wettstreit oder Glanz. Deshalb ist es zweckmässig, die Conturen durch mangelhafte Accommodation zu verwischen.

Sucht man die Conturen dadurch zu vermeiden, dass man z. B. eine grosse unbegrenzte und ganz gleichartige Fläche betrachtet, während vor beide Augen verschiedenfarbige Gläser gehalten werden, so treten andere grosse Uebelstände auf. Erstens nämlich kann dann in den seitlichen, nur unocularen Theilen des Sehfeldes die eine Farbe ungestört von der andern sich geltend machen, und zweitens werden die nicht correspondirenden Ungleichartigkeiten der Erregbarkeit der beiden Netzhäute viel störender, als auf einer kleinen Fläche. Denn durch die Erregbarkeitsverschiedenheiten zweier correspondirender Netzhautpartien entsteht stellenweise eine Prävalenz der einen Farbe über die andere in ähnlicher

Weise wie durch objective Ungleichartigkeiten der beiden zu verschmelzenden Flächen.

Wenn über das thatsächliche Vorkommen der binocularen Farbenmischung kein Zweifel mehr sein kann, so erhebt sich die weitere Frage, inwiefern die Ergebnisse dieser Mischungsmethode denen analog sind, welche man durch Mischung verschiedenartigen Lichtes auf einer und derselben Netzhautstelle erhält. In dieser Beziehung fällt zunächst ein wesentlicher Unterschied auf. Hat man durch haploskopische Betrachtung zweier farbigen Flächen eine Mischfarbe erhalten und lässt dann genau dieselben farbigen Lichtmengen auf eine und dieselbe Netzhautstelle fallen, so ergibt sich eine ungleich hellere oder weisslichere Mischfarbe. Lässt man dagegen von jeder der beiden farbigen Lichtmengen nur die Hälfte auf eine und dieselbe Netzhautstelle wirken, so ist die Helligkeit oder Weisslichkeit der resultirenden Farbenempfindung gleicher Ordnung, wie die aus der binocularen Mischung sich ergebende Empfindung. Bringt man also die beiden Farben zu gleichen Hälften auf den Farbenkreisel oder mischt man die Farben mit dem Doppelspath, so erhält man eine Resultirende, welche sich in Betreff der Helligkeit wenigstens nicht auffallend von der durch binoculare Mischung erhaltenen Empfindung unterscheidet. Hieraus folgt schon ein höchst wesentlicher Unterschied der binocularen Farbenmischung von der unocularen, gleichviel ob letztere nur in einem Auge oder in beiden zugleich auf correspondirenden Stellen vorgenommen wird. Bei der unocularen Mischung handelt es sich um eine Art Summirung oder Superposition der Reize, und die resultirende Empfindung ist stets bedeutend heller als jede der beiden Empfindungen, welche nur durch die eine Componente des Lichtgemisches erzeugt werden. Mischt man aber die beiden Farben binocular, so ist die resultirende Mischfarbe nur ungefähr gleich hell, wie die Einzelfarbe.

Diese Thatsachen genügen schon, um selbst in den Fällen, wo die binoculare Mischung vollkommen gelingt, dieselbe der unocularen nicht gleichzustellen. Es ist, als ob beim Binocularsehen beide Netzhäute sich im gemeinsamen Sehfelde gleichsam nur mit einem Bruchtheile der ihnen zugehörigen Empfindung geltend machen könnten, und zwar so, dass diese Bruchtheile sich immer zu 1 ergänzen. Hering [1] nannte dies den Satz vom complementären Antheil der beiden Netzhäute am Sehfelde. Diesem Satze ordnen sich nicht nur die Thatsachen des Wettstreits unter, sondern auch die der unocu-

[1] Hering, Beitr. z. Physiol. § 121. 1864.

laren Farbenmischung; endlich noch einige Thatsachen, die man wohl auch als paradoxe bezeichnet hat.

Man sieht im Allgemeinen die Dinge mit beiden Augen nicht heller, als mit einem. Ist nämlich das eine Auge geschlossen oder ganz verdunkelt, so hat es fast gar keinen Antheil an dem gemeinsamen Mittelstücke des Sehfeldes. Sind beide Augen geöffnet, so participirt jedes Auge gleichsam nur mit der Hälfte seiner Empfindung am Sehfelde, so dass das Ergebniss dasselbe ist, wie wenn das eine Auge ganz unbetheiligt ist. Findet ein Wettstreit statt z. B. zwischen dem Schwarz des einen und dem Weiss des andern Auges, so sieht man bald reines Schwarz, bald reines Weiss, je nachdem eben die eine oder die andere Netzhaut vollständig dominirt, oder man sieht ein glänzendes Grau, welches bald heller bald dunkler ist, bald dem Weissen gleich nahe steht wie dem Schwarzen, aber man sieht doch nie das volle Weiss und das volle Schwarz zugleich an derselben Stelle des Sehfeldes. Man kann es leicht so einrichten, dass im binocularen Sehraum eine im einen Auge abgebildete weisse Fläche vor oder hinter einer vom andern Auge gesehenen schwarzen erscheint. Dann verschwindet einmal die eine, dann wieder die andere, und dazwischen sieht man beide zugleich, aber die eine gleichsam durch die andere hindurch, wie durch ein Glas oder einen Schleier. Aber auch diesenfalls kann man durchaus nicht sagen, dass man eine reinweisse und eine reinschwarze Fläche hinter einander sehe, obwohl hierfür wegen der räumlichen Sonderung der beiden Flächen gewiss die günstigsten Bedingungen vorliegen, die man sich denken kann. Vielmehr ist das Weiss der einen Fläche immer durch das Schwarz der andern beeinträchtigt und gleichsam abgeschwächt, weil eben jede Netzhaut ihre Empfindung nur theilweise geltend machen kann.

Fechner (l. c.) zeigte, dass vollständige Verdunkelung eines bis zu gewissem Grade schon verdunkelten Auges bei unverdunkeltem andern Auge eine Erhellung des gemeinsamen Sehfeldes bewirkt, obwohl jetzt auf beide Netzhäute zusammen weniger Licht fällt, als zuvor. Er blickte z. B. gegen den Himmel oder eine weisse Thüre und hielt vor das eine Auge ein graues Glas, welches diesem Auge Alles bis zu einem gewissen Grade verdunkelte. Schloss oder verdunkelte er nun dieses Auge vollständig, so wurde das Sehfeld heller, obgleich jetzt nur noch in ein Auge Licht fiel. So lange das eine Auge noch offen war, hatte es noch Antheil am gemeinsamen Sehfelde und lieferte einen Theil seiner relativ dunklen Empfindungen zur Herstellung der aus den Empfindungen beider Augen

resultirenden Mischempfindungen; wurde das Auge aber ganz verdunkelt, so sank sein Antheil am gemeinsamen Sehfelde fast auf Null herab, daher sich das letztere aufhellen musste. Analog konnte Fechner, wenn er in das anfangs ganz verdunkelte Auge wieder etwas Licht fallen liess, die Helligkeit des gemeinsamen Sehfeldes abnehmen sehen. Das plötzlich etwas beleuchtete Auge machte sich dabei wieder mit seiner dunklen Empfindung im Sehfelde geltend.

Der Satz vom complementären Antheile der Netzhäute oder der Empfindungen am Sehraume kann nur ein zusammenfassender Ausdruck für die bekannten Thatsachen sein. Auf eine wirkliche Erklärung derselben, wie sie sich aus Hering's Theorie der Gesichtsempfindungen und dem von ihm aufgestellten psychophysischen Grundgesetze geben liesse, kann hier nicht eingegangen werden, weil weder jene Theorie noch dieses Gesetz in den bezüglichen Capiteln dieses Handbuches erörtert werden konnte.

Abgesehen von der Helligkeit gilt es auch, die binocular gewonnene Mischfarbe mit der durch unoculare Mischung erhaltenen in Betreff des Farbentones zu vergleichen. Bei der Herstellung der unocularen Mischfarbe kann man sich entweder des Farbenkreisels bedienen, welcher mit jeder der beiden Farben zur Hälfte bedeckt wird, oder mit Helmholtz des Doppelspathes, welcher ebenfalls nur die halben Lichtquantitäten der beiden Farben mischt. Man thut dann gut, ein farbiges Papier herzustellen, dessen Farbe der gefundenen Mischfarbe genau gleicht. Bringt man einen langen Streifen dieses Papiers in der oben beschriebenen Weise oherhalb oder unterhalb der haploskopisch verschmolzenen Quadrate an, so kann man die binoculare Mischfarbe mit der unocularen direct vergleichen. Man findet dann fast immer eine deutliche Verschiedenheit des Tones, günstigen Falls aber gelingt es vorübergehend einen Ton der binocularen Mischfarbe zu finden, welcher der unocularen Mischfarbe genau gleicht; denn die erstere ist ja selten ganz stetig und spielt meistens abwechselnd mehr in die eine oder die andere Componente. Stellt man sich aber eine grössere Anzahl der Uebergangstöne von der einen zur andern Farbe mittels farbiger Papiere dar, so kann man unter Umständen, wo die Herstellung einer stetigeren, binocularen Mischfarbe mit Sicherheit gelingt, auch den entsprechenden Farbenton unter jenen Papieren finden. Es ist dies aber keineswegs nothwendig derselbe, welchen man erhält, wenn man die beiden Farben unocular zu gleichen Theilen mischt. Dass es Jemand gelungen sei, durch binoculare Mischung von Gegenfarben (Complementärfarben) genau

dasselbe Grau zu erhalten, wie durch unoculare Mischung zu gleichen Theilen, finden wir nirgends angegeben.

Helmholtz hat die Möglichkeit einer binocularen Farbenmischung überhaupt bezweifelt und für seine Augen sogar entschieden bestritten. Es hatte dies seinen Grund offenbar darin, dass er erstens nicht für die Ausschliessung aller irgend entbehrlichen Conturen und Ungleichartigkeiten sorgte, und dass er zweitens die Forderung stellte, die binoculare Mischfarbe solle durchaus derjenigen gleichen, welche man durch unoculare Mischung zu gleichen Hälften bekommt, was schon theoretisch nur als ein besonderer Fall erscheinen muss. Helmholtz beschreibt folgenden Versuch: „Man legt zwei blaue und zwei rothe quadratische Felder wie die eines Schachbretts zusammen, so dass z. B. das rechte obere und linke untere blau, das linke obere und rechte untere roth sind. Dann bringt man vor jedes Auge ein doppelbrechendes achromatisirtes Kalkspathprisma in derjenigen Stellung, dass es über einander liegende Doppelbilder giebt. Indem die Doppelbilder der farbigen Felder sich theilweis über einander schieben, entsteht für jedes Auge längs der horizontalen Trennungslinie der farbigen Felder ein aus Roth und Blau monocular gemischter, also rosarother Streifen. Jetzt blickt man mit parallelen Gesichtslinien nach den Feldern hin, so dass ihre Bilder sich binocular übereinanderschieben. Dann hat man oben rechtes Blau und linkes Roth sich deckend, in der Mitte Rosaroth mit Rosaroth, unten rechtes Roth mit linkem Blau. Unter diesen Umständen ist es für meine Augen ganz deutlich, dass in der binocularen Combination von Blau und Roth keine Spur von dem Rosenroth, wie es der mittlere Streifen zeigt, enthalten ist, sondern nur die beiden einzelnen Farben getrennt."

Eine kleine Modification des Versuches führt jedoch auch hier bisweilen zum Ziele. Man lege die Quadrate nicht dicht neben einander, sondern so, dass ein Streifen des Grundes sie trennt, ferner mache man sie so klein, dass sich die unteren mit den oberen genau decken, und nicht bloss in einander greifen, wenn man sie durch den Doppelspath betrachtet. Ueber das obere rothe Quadrat lege man noch ein gleich grosses rothes, über das obere blaue noch ein gleiches blaues. Dann sieht man mittels des Spathes 8 Quadrate. Die beiden oberen und die beiden unteren Quadrate kommen nicht in Betracht, denn es sind nur Halbbilder. Die zweituntersten erscheinen in der unocularen Mischfarbe, von den zweitobersten ist das eine blau, das andere roth. Bringt man beide Quadratreihen binocular zur Deckung, so sieht man drei Längsreihen, deren mittlere binocular ist und uns hier allein interessirt. In dieser Reihe zeigt das zweite Quadrat von oben die binoculare, das nächstuntere aber die unoculare Mischfarbe. Sind die zu mischenden Farben nicht zu hell und nicht zu gesättigt, so gleicht bisweilen die unoculare Mischfarbe der binocularen in Betreff des Tones vollkommen. Immerhin ist dies, wie sich nach dem oben Gesagten von selbst versteht, nur ein besonders glücklicher Fall.

Helmholtz hat, da er als unoculare Mischfarbe von „Roth" und Blau ein helles Rosa fand, offenbar mit hellen Farben und wahrschein-

lich sogar auf schwarzem Grunde gearbeitet, wodurch er Wettstreit und Glanz begünstigt hat.

II. Ueber binocularen Contrast.

Man lege auf eine schwarze Fläche einen weissen Streifen, spalte letzteren durch Schielen in ein Doppelbild und bringe vor das rechte Auge ein blaues, vor das linke ein graues Glas, so wird man das Bild des rechten Auges blau, das Bild des linken Auges aber gelblich sehen, und zwar am sichersten dann, wenn der Streifen durch das graue Glas gesehen gleich hell erscheint, wie durch das blaue. Um die ins linke Auge fallende Lichtmenge passend zu schwächen, kann man sich statt des grauen Glases auch eines steifen Papiers mit einem kleinen Loche bedienen, welches man dicht vor das linke Auge bringt.

Das Gelb des linken Bildes ist eine Contrastempfindung; denn so lange der Streifen nur mit dem linken Auge betrachtet wird, erscheint er grau, sobald aber das rechte Auge geöffnet und seine Netzhaut blau bestrahlt wird, färbt er sich gelb. Diese Art des Contrastes kann also nur beim binocularen Sehen entstehen. Gleichgültig ist es natürlich, vor welches Auge man das farbige Glas bringt. Ebenso kann man statt des blauen irgend ein anders gefärbtes Glas benutzen, immer färbt sich das Bild des anderen Auges mit der Gegenfarbe (Complementärfarbe).

Legt man einen schwarzen Streifen auf weissen Grund und verfährt im Uebrigen ganz ebenso, wie beim vorigen Versuche, so erscheint das Bild des rechten Auges umsäumt von einem blauen, das des linken von einem gelblichen Randscheine, der Grund aber erscheint im Allgemeinen weisslichblau, und seine Farbe ist dem Wettstreite unterworfen, wird also bald weisslicher, bald blauer.

Der deutlich blaue Saum des rechtsäugigen Bildes ist dadurch bedingt, dass die Conturen des Streifens dem ihnen anliegenden Blau zur Prävalenz im Sehfelde verhelfen, wie dies im IV. Capitel erörtert worden ist. Aus demselben Grunde entsteht der Randschein des linksäugigen Bildes, welcher, wenn nicht der Contrast da wäre, lediglich weiss sein müsste, durch letzteren aber gelblich gefärbt wird. Auch bei diesem Versuch kann man Gläser von beliebig anderer Farbe mit analogem Erfolge benutzen.

Der binoculare Contrast bietet ein gutes Mittel, um selbst kleine Verschiedenheiten in der sogenannten Stimmung beider Augen zu entdecken. Hat man ein Auge einige Zeit geschlossen und dadurch seine Empfindlichkeit gesteigert, und man spaltet dann das Bild eines

grauen Streifen auf schwarzem Grunde zu einem Doppelbild, so erscheint das Bild des vorher geschlossenen Auges auffallend heller und meist unterscheiden sich auch beide Bilder durch ihre Farbe. Stellt man z. B. den Versuch bei künstlicher Beleuchtung an, in welcher die gelben Strahlen überwiegen, so erscheint das Bild des zuvor geschlossenen Auges gelblich, das des offen gebliebenen Auges bläulich. Man kann sich auf diese Weise überzeugen, dass auch das Tageslicht fast immer farbig ist, jedoch verschieden je nach dem Stande der Sonne und je nach der Art der Bewölkung des Himmels. Blickt man mit einem Auge kurze Zeit durch ein farbiges Glas nach hellen Objecten und stellt den obigen Versuch an, so spielt das Bild dieses Auges in die Gegenfarbe des Glases, das des anderen Auges aber in die Farbe des Glases selbst.

Ausser durch die Pupille empfangen die Netzhäute auch etwas Licht durch die Sklera. Die Quantität dieses Lichtes ist verschieden je nach der Stellung, welche man zur Lichtquelle hat. Ist unser Kopf durch ein Fenster oder eine andere Lichtquelle seitlich beleuchtet, so empfängt das eine Auge mehr Licht durch die Sklera als das andere; die Folge ist nicht nur eine verschiedene Helligkeit und Färbung der beiden Netzhautbilder eines und desselben Aussendinges, sondern auch weiterhin eine verschiedene Stimmung beider Augen. Erzeugt man sich unter solchen Umständen das Doppelbild eines hellen Streifens auf dunklem Grunde, so erscheinen seine beiden Bilder verschieden hell und verschieden gefärbt.

Die meisten in das Gebiet der binocularen Contrasterscheinungen gehörigen Thatsachen hat Fechner beigebracht, einzelne Beobachtungen finden sich schon bei Brücke, Meyer und Panum. Fechner sieht im binocularen Contrast die Folge einer Wechselwirkung der Netzhäute auf einander; Helmholtz erklärt ihn, wie alle Contraste, psychologisch. Die Literatur des binocularen Contrastes siehe bei Fechner[1] und Helmholtz[2].

1 Fechner, Ueber einige Verhältnisse des binocularen Sehens. Ber. d. sächs. Ges. d. Wiss. VII. 1860.

2 Helmholtz, Physiol. Optik S. 794.

Druckfehler.

Seite	252	Zeile	7 v. o.	statt von	lies	aus
„	257	„	21 v. o.	„ des	„	der
„	257	„	31 v. o.	„ welche	„	welchen
„	258	„	16 v. u.	in d. Ueberschr. statt 2.	„	3.
„	258	„	6 v. u.	statt mikroskopisch	„	makroskopisch
„	262	„	13 v. o.	„ angeschmolzene	„	angeschmolzenen
„	275	„	12 v. o.	„ Chorioïcapillaris	„	Choriocapillaris
„	275	„	29 v. o.	„ erkannt habe	„	entgangen sei
„	294	„	6 v. u.	„ Cromophane	„	Chromophane
„	308	„	7 v. u.	„ ebenso so	„	ebenso
„	350	„	6 v. o.	„ das	„	dies
„	360	„	18 v. o.	„ 1°15″	„	1°15′
„	379	„	10 v. o.	„ Meridianhoropter,	„	Meridianhoropter.

Druck von J. B. Hirschfeld in Leipzig.

MEDICINISCHER VERLAG VON F. C. W. VOGEL IN LEIPZIG.

Zeitschriften.

Deutsches Archiv für klinische Medicin, herausgegeben von Prof. Ackermann in Halle, Prof. Bäumler in Freiburg, Prof. Biermer in Breslau, Dr. Birch-Hirschfeld in Dresden, Prof. v. Buhl in München, Prof. Duchek in Wien, Prof. Ebstein in Göttingen, Dr. Fiedler in Dresden, Prof. Friedreich in Heidelberg, Prof. Gerhardt in Würzburg, Prof. Heller in Kiel, Prof. Herz in Amsterdam, Prof. F. Hoffmann in Dorpat, Prof. Immermann in Basel, Prof. Jürgensen in Tübingen, Prof. Kussmaul in Strassburg, Prof. Leube in Erlangen, Prof. Lichtheim in Bern, Prof. Liebermeister in Tübingen, Prof. Mannkopf in Marburg, Dr. G. Merkel in Nürnberg, Prof. Mosler in Greifswald, Prof. Naunyn in Königsberg, Prof. Nothnagel in Jena, Prof. Quincke in Kiel, Prof. Riegel in Giessen, Prof. Rosenstein in Leyden, Prof. Rühle in Bonn, Prof. v. Schüppel in Tübingen, Prof. Th. Thierfelder in Rostock, Prof. A. Vogel in Dorpat, Prof. E. Wagner in Leipzig, Dr. H. Weber in London, Prof. Th. Weber in Halle, Prof. Zenker in Erlangen und Prof. v. Ziemssen in München.

Redigirt von Prof. Dr. **H. v. Ziemssen** (München) und Prof. Dr. **F. A. Zenker** (Erlangen).

Mit zahlreichen Holzschnitten und Tafeln. gr. 8.

Bd. I.-XI. à Bd. 13 M. Bd. XII.-XXIV. à Bd. 15 M. Bd. XXV. 16 M.

(Das Archiv erscheint in zwanglosen Heften, deren 6 Einen Band von ca. 40 Bogen bilden.)

Archiv für Experimentelle Pathologie und Pharmakologie, herausgegeben von Prof. Dr. **Edwin Klebs** (Prag) Prof. Dr. **B. Naunyn** (Königsberg) und Prof. Dr. **O. Schmiedeberg** (Strassburg).

Mit zahlreichen Holzschnitten und Tafeln. gr. 8.

Bd. I.—IV. 1872—1875. à Bd. 13 M. Bd. V.—XII. — 1880. à Bd. 15 M.

(Das Archiv erscheint in zwanglosen Heften, deren 6 Einen Band von ca. 30 Bogen bilden.)

Archiv für Ohrenheilkunde, im Verein mit Prof. A. Böttcher in Dorpat, Prof. Ad. Fick in Würzburg, Prof. C. Hasse in Breslau, Prof. V. Hensen in Kiel, Prof. A. Lucae in Berlin, Prof. E. Mach in Prag, Dr. A. Magnus in Königsberg, Prof. A. Prussak in St. Petersburg, Prof. E. Zaufal in Prag, Dr. L. Jacoby in Breslau, Dr. J. Kessel in Graz, W. Meyer in Kopenhagen, Dr. F. Trautmann in Berlin, Dr. J. Urbantschitsch in Wien,

herausgegeben von Prof. **v. Tröltsch** (Würzburg), Prof. **Adam Politzer** (Wien) und Prof. **H. Schwartze** (Halle).

Mit zahlreichen Holzschnitten und Tafeln. 8.

Band VII.—XV. 1873—1879. à Band 13 M.

(Das Archiv erscheint in zwanglosen Heften, deren 4 Einen Band von ca. 20 Bogen bilden.)
[Band I.—VI. erschienen im Verlag der Stahel'schen Buchhandlung in Würzburg.]

Deutsche Zeitschrift für Chirurgie, herausgegeben von Prof. Bardeleben (Berlin), Prof. Baum (Göttingen), Dr. Beck (Carlsruhe), Prof. Bergmann (Giessen), Prof. Braune (Leipzig), Prof. v. Bruns (Tübingen), Prof. Busch (Berlin), Dr. Danzel (Hamburg), Prof. Doutrelepont (Bonn), Dr. G. Fischer (Hannover), weil. Prof. Heine (Prag) Prof. Heineke (Erlangen), Dr. O. Heyfelder (St. Petersburg), Prof. C. Hueter (Greifswald), Prof. Kocher (Bern), Prof. König (Göttingen), Prof. Lücke (Strassburg), Prof. Maas (Freiburg), Dr. Neudörfer (Wien), Prof. v. Nussbaum (München), Dr. Passavant (Frankfurt a. M.), Prof. Ried (Jena), Prof. Rose (Zürich), Prof. Schuppert (New-Orleans), weil. Prof. Simon (Heidelberg), Prof. Socin (Basel) Prof. Thiersch (Leipzig), Prof. Volkmann (Halle) und Prof. Wernher (Giessen).

Redigirt von Prof. Dr. **C. Hueter** (Greifswald) u. Prof. Dr. **A. Lücke** (Strassburg).

Mit zahlreichen Holzschnitten und Tafeln. gr. 8.

Bd. I.-II. 1872. 1873. à Bd. 14 M. Bd. III.-XII. 1873-1879. à Bd. 15 M.

(Die Zeitschrift erscheint in zwanglosen Heften, deren 6 Einen Band von ca. 40 Bogen bilden.)

MEDICINISCHER VERLAG VON F. C. W. VOGEL IN LEIPZIG.

Deutsche Zeitschrift für **Thiermedicin und vergleichende Pathologie,** herausgegeben von Kreisthierarzt Adam (Augsburg), Obermarstallthierarzt Albrecht (Berlin), Prof. Bruckmüller (Wien), Prof. Bugnion (Bern), Prof. Dammann (Hannover), Prof. Esser (Göttingen), Prof. Feser (München), Prof. Friedberger (München), Dr. Graff (Aschaffenburg), Medicinalrath Günther (Hannover), Prof. Hahn (München), Dr. Harms (Hannover), Privatd. Harz (München), Prof. Kehrer (Giessen), Prof. Klebs (Prag), Prof. Köster (Bonn), Dr. Krabbe (Kopenhagen), Hofthierarzt Lydtin (Carlsruhe), Dr. Lustig (Hannover), Prof. Pagenstecher (Heidelberg), Dr. Paulicki (Coblenz), Prof. Perls (Giessen), Prof. Pflug (Giessen), Dr. Rabe (Hannover), Dir. Schmidt (Frankfurt), Medic.-Assessor Schuster (Jena), Prof. Semmer (Dorpat), Prof. Stockfleth (Kopenhagen), Obermedicinalrath Straub (Stuttgart), Prof. Vogel (Stuttgart), Prof. Wehenkel (Brüssel), Prof. Wirtz (Utrecht), Prof. Zahn (Wien), Dir. Zangger (Zürich), Landesthierarzt Zündel (Strassburg), Prof. Zürn (Leipzig), Prof. Zuntz (Bonn).

Redigirt von Prof. Dr. **O. Bollinger** und Prof. Dr. **L. Franck** (München).
Mit zahlreichen Tafeln und Holzschnitten. 8.

Band I.—VI. 1875—1880. à Band 9 M.

(Die Zeitschrift erscheint in zwanglosen Heften, deren 6 Einen Band von ca. 30 Bogen bilden.)

Zeitschrift für **Anatomie u. Entwickelungsgeschichte.** Unter Mitwirkung von Prof. Aeby (Bern), Prof. Braune (Leipzig), Prof. Ecker (Freiburg), Prof. Gerlach (Erlangen), Prof. Henke (Tübingen), Prof. Hensen (Kiel), Prof. His (Leipzig), Prof. Langer (Wien), Prof. Lieberkühn (Marburg), Prof. Merkel (Rostock), Prof. Herm. Meyer (Zürich), Dr. G. Retzius (Stockholm), Prof. Rüdinger (München), Prof. Schwalbe (Jena), Prof. Volkmann (Halle), Prof. Welcker (Halle),

herausgegeben von Prof. Dr. **Wilh. His** u. Prof. Dr. **Wilh. Braune.**
Mit zahlreichen Holzschnitten und Tafeln. gr. 8.

Band I. Mit 58 Holzschnitten und 16 Tafeln. 1876. 46 M.
1. u. 2. Heft. 1875. 12 M. — 3. u. 4. Heft. 1875. 18 M. — 5. u. 6. Heft. 1876. 16 M.

Band II. Mit 27 Holzschnitten und 20 Tafeln. 1877. 50 M.
1. u. 2. Heft. 1876. 18 M. — 3. u. 4. Heft. 1876. 16 M. — 5. u. 6. Heft. 1877. 16 M.

[Jedes Heft ist auch einzeln käuflich.]
(Die Zeitschrift erscheint vom III. Band ab im Verlag von Veit & Co. in Leipzig.)

Jahresberichte über die Fortschritte der **Anatomie und Physiologie.**

In Verbindung mit Prof. Aeby (Bern), Prof. K. Bardeleben (Jena), Prof. Bizzozero (Turin), Prof. E. Drechsel (Leipzig), Prof. W. v. Ebner (Graz), Prof. Hermann (Zürich), Prof. O. Hertwig und Prof. R. Hertwig (Jena), Prof. Hoyer (Warschau), Dr. v. Ihering (Leipzig), Prof. Kollmann (Basel), Dr. Küster (Leipzig), Dr. P. Mayer (Neapel), Dr. Mayzel und Prof. Nawrocki (Warschau), Prof. Panum (Kopenhagen), Dr. G. Retzius (Stockholm), Dr. Spengel (Göttingen), Dr. T. Tullberg (Upsala), herausgegeben von Prof. Dr. **F. Hofmann** (Leipzig) und Prof. Dr. **G. Schwalbe** (Jena). **I.—V. Band.** gr. 8. 1873—1879.

Band I. (Literatur 1872.) 1873. 12 M. — **Band II.** (1873.) 1875. 14 M. — **Band III.** (1874.) 1. Anatomie und Entwickelungsgeschichte. 2. Physiologie. 1875. 14 M. — **Band IV.** (1875.) 1876. 14 M. — **Band V.** (1876.) 1877. 19 M. — **Band VI.** (1877.) 1878. 1. Anatomie. 10 M. 2. Entwicklungsgeschichte. Anatomie d. Wirbellosen Thiere. 6 M. 3. Physiologie. 1878. 8 M. — **Band VII.** (1878.) 1879. 1. Anatomie. 10 M. 2. Entwicklungsgeschichte. 6 M. 3. Physiologie. 10 M.

Jahresbericht, VI., des **Landes-Medicinal-Collegiums** über das Medicinalwesen im Königreich Sachsen a. d. Jahr 1874. gr. 8. 1876. **VII.** (1875.) 1877. — **VIII.** (1876.) 1878. **IX.** (1877.) 1879. à 4 M.

Jahresbericht d. k. **Central-Thierarzneischule** in München. 1876/1877. 8. 1878. — 1877/1878. 8. 1879. à 2 M.

(Erscheint auch als Supplementheft zur Deutschen Zeitschrift f. Thiermedicin u. vergl. Pathologie.)

Bayerische
Staatsbibliothek
München

MEDICINISCHER VERLAG VON F. C. W. VOGEL IN LEIPZIG.

Lehrbuch der Ohrenheilkunde



mit Einschluss der

Anatomie des Ohres

von

Dr. A. v. Tröltsch,
Prof. in Würzburg.

Sechste umgearbeitete Auflage.

Mit 21 Holzschnitten im Text.

gr. 8. 1877. 14 M.

Aeby, Prof. Chr. (Bern), Lehrbuch der Anatomie, für Aerzte und Studirende. Mit 391 Holzschnitten. gr. 8. 1871. 18 M.

Beiträge zur Anatomie und Physiologie. Carl Ludwig als Festgabe gewidmet von seinen Schülern. Mit 30 Holzschnitten und 14 Tafeln. gr. 4. 1875. 60 M.

Faber, Dr. C. (Leipzig), Der Bau der Iris des Menschen und der Wirbelthiere mit besonderer Berücksichtigung ihrer Muskulatur. Gekrönte Preisschrift. Mit 1 Tafel. gr. 8. 1876. 3 M.

Hensen, Prof. V. (Kiel), Physiologie des Gehörssinnes.

Heilanstalt, Die, für arme Augenkranke zu Leipzig zur Zeit ihres 50 jährigen Bestehens. Eine Erinnerungsschrift von Prof. Dr. Ernst Coccius u. Dr. Th. Wilhelmi. gr. 8. 1870. 3 M.

Jahresberichte der Anatomie u. Physiologie.

Michel, Prof. (Erlangen), Ueber die Ausstrahlungsweise der Opticusfasern in der menschl. Retina. Mit 2 Tafeln. gr. 4. 1875. 2 M.

Müller, Prof. W. (Jena), Ueber die Stammesentwickelung des Sehorgans der Wirbelthiere. Mit 5 Tafeln. gr. 4. 1875. 16 M.

Oertel, Prof. M. J. (München), Ueber den laryngologischen Unterricht. Mit 5 Chromolith. Tafeln. gr. 8. 1878. Sep.-Abdr. 3 M.

Schreiber, Dr. A. (Augsburg), Ueber die Veränderungen des Augenhintergrundes bei internen Erkrankungen. Mit 8 Tafeln. gr. 8. 1878. Sep.-Abdr. 5 M. 60 Pf.

Archiv für Ohrenheilkunde. pro Band 13 M.

Handbuch der Physiologie.

1879 erschienen:

ERSTER BAND.
Physiologie der Bewegungsapparate.

I. Theil.	**Allgemeine Muskelphysik**	*Prof. L. Hermann.*	10 ℳ
	Stoffwechsel der Muskeln	*Prof. O. Nasse.*	
	Flimmer- und Protoplasmabewegung	*Prof. W. Engelmann.*	
II. Theil.	**Stimme und Sprache**	*Doct. P. Grützner.*	9 ℳ
	Specielle Bewegungslehre	*Prof. A. Fick.*	

ZWEITER BAND.
Physiologie des Nervensystems.

I. Theil.	**Allgemeine Nervenphysiologie** . . .	*Prof. L. Hermann.*	6½ ℳ
	Specielle Nervenphysiologie . . .	*Prof. Sigm. Mayer.*	
II. Theil.	**Rückenmark. — Gehirn**	*Prof. C. Eckhard.*	10 ℳ
	Grosshirnrinde	*Prof. Sigm. Exner.*	

DRITTER BAND.
Physiologie der Sinnesorgane.

I. Theil.	**Gesichtssinn:** Dioptrik, Accommodation, Licht- u. Farbensinn, Nebenapp. d. Auges	*Prof. A. Fick.*	15 ℳ
	Chemische Vorgänge in der Netzhaut .	*Prof. W. Kühne.*	
	Raumsinn des Auges, Augenbewegung	*Prof. E. Hering.*	
II. Theil.	**Gehör**	*Prof. V. Hensen.*	— ℳ
	Geschmackssinn. — Geruchssinn . .	*Prof. M v. Vintschgau*	
	Tastsinn und Gemeingefühle . . .	*Prof. O. Funke.*	
	Temperatursinn	*Prof. E. Hering.*	

1880 werden erscheinen:

VIERTER BAND.
Physiol. des Kreislaufs, der Athmung u. d. thierischen Wärme.

Blut und Blutbewegung	*Prof. A. Rollett.*
Innervation der Kreislaufsorgane	*Prof. H. Aubert.*
Blutgase und respiratorischer Gaswechsel	*Prof. N. Zuntz.*
Athembewegungen und Innervation derselben / **Thierische Wärme**	*Prof. J. Rosenthal.*

FÜNFTER BAND.
Physiologie der Absonderung und Aufsaugung.

Physiologie der Absonderungsprocesse, excl. Schweissabsonderung	*Prof. R. Heidenhain.*
Schweissabsonderung	*Prof. B. Luchsinger.*
Chemie der Secrete, excl. Verdauungssäfte / **Chemie der Gewebe**, excl. Muskeln u. Drüsen . . .	*Prof. H. Huppert.*
Verdauungssäfte und Verdauung	*Prof. R. Maly.*
Resorption, Lymphbildung, Assimilation	*Prof. W. v. Wittich.*
Bewegungen der Eingeweide (incl. Physiol. der glatten Muskeln)	*Prof. Sigm. Mayer.*

SECHSTER BAND.
Physiologie des Gesammt-Stoffwechsels u. d. Fortpflanzung.

Allgemeiner Stoffwechsel	*Prof. C. v. Voit.*
Zeugung	*Prof. V. Hensen.*

= ***Jeder Band ist auch einzeln käuflich.*** =

☞ Bisher erschienen **Band I. 1.** = 10 Mk.; **Band I. 2.** = 9 Mk.; **Band II. 1.** = 6 Mk. 50 Pf.; **Band II. 2.** = 10 Mk.; **Band III wird noch in diesem Jahre, Band IV—VI** 1880 erscheinen. ☜

Druck v. Hirschfeld, Leipzig.

9.96
BUCHBINDEREI
OBERMEIER
Niederlassung München
Heßstraße 14
80799 München
Telefon 089/2800116

BSB Bayerische StaatsBibliothek

MDZ Münchener DigitalisierungsZentrum Digitale Bibliothek

/ Fick, Adolf, / Kühne, Wilhelm,

Gesichtssinn

Leipzig 1879

Anat. 223 fhk-3,1
urn:nbn:de:bvb:12-bsb11385941-1